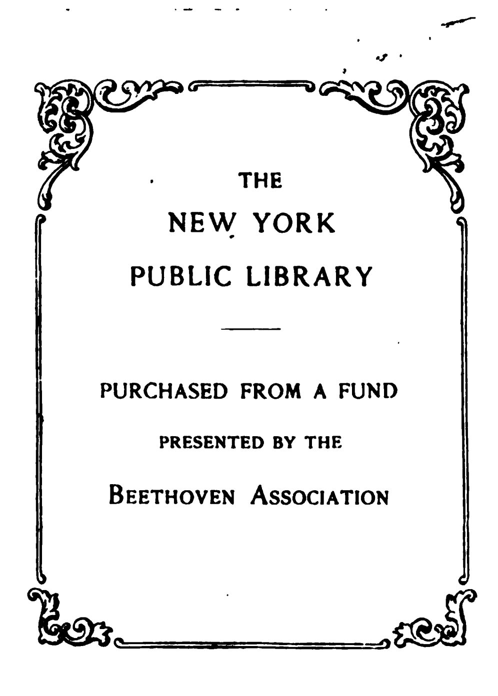
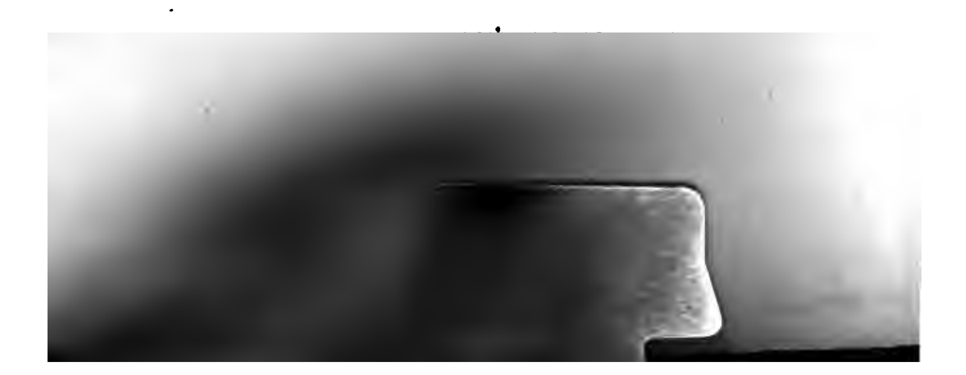


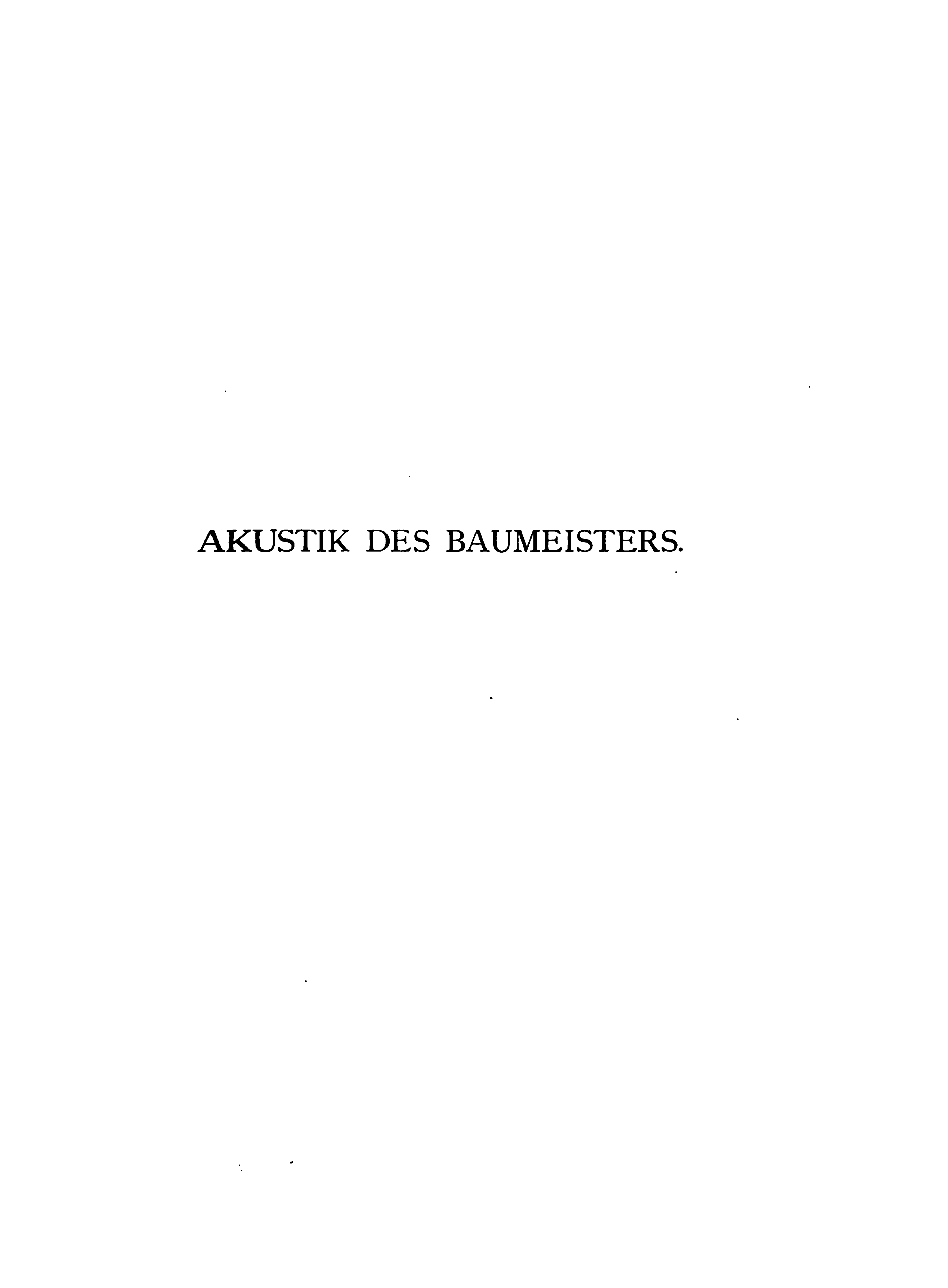
NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06640486 8


THE
NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
PURCHASED FROM A FUND
PRESENTED BY THE
BEETHOVEN ASSOCIATION





PF
Sturmhoef



# AKUSTIK DES BAUMEISTERS.

# AKUSTIK DES BAUMEISTERS

ODER

# DER SCHALL IM BEGRENZTEN RAUME.

ENTWICKELT

VOM

**A. STURMHOEFEL**
(STADTBAURATH A. D.

MIT 26 ABBILDUNGEN IM TEXT.

ZWEITE, DURCH EINEN NACHTRAG VERMEHRTE AUFLAGE.

DRESDEN
GERHARD KÜHTMANN
1898.

# VORWORT.

Die Schallentwickelung in Kirchen, Hörsälen, Konzerträumen, Theatern u. s. w. ist bisher auffallend selten untersucht und behandelt worden. Naturforscher haben Anstand genommen, dieses Feld zu betreten, nicht wegen der aufserordentlichen Schwierigkeiten, sondern weil bei der Gestaltung der erwähnten grofsen Innenräume andere mehr praktisch greifbare Aufgaben erfüllt werden müssen, deren Lösung Sache des Baumeisters ist. So haben sich denn auch nur vorzugsweise Baumeister mit dieser Materie beschäftigt. Langhans hat die Theater, Daly, Davioud und Bourdais die grofsen Rotunden, Lachez die nothwendigen Sitzüberhöhungen in Hörsälen, Orth die Kirchen besprochen. Alle sind durch die Nothwendigkeit, sich Rechenschaft zu geben über die Zweckmäfsigkeit ihrer Bauten, zu diesen Untersuchungen veranlafst worden. Sie haben nachher die Verpflichtung empfunden, die gemachten Erfahrungen ihren Fachgenossen nicht vorzuenthalten. Diese lehrreichen Veröffentlichungen haben sich indessen immer nur auf beschränkte Gebiete bezogen. So fanden sie selten einen allgemeineren Leserkreis. Die meisten Baumeister pflegten nur

für den gerade vorliegenden Fall, dessen Vorbedingungen stets neue und andere waren, Anhalt und Aufschlufs zu suchen. Sie finden die Sache aber umständlicher, als sie erwartet hatten. Schliefslich wurden die Schwierigkeiten wie ein verwickelter Knoten nach klassischem Muster glatt durchhauen. Dieses Gehenlassen „wie es Gott gefällt“ ist selbst bei mittelgrofsen Räumen, auf Entfernungen, bei denen man im freien Felde noch deutlich hört, nur all zu oft zu merken. Das Publikum besitzt nicht mehr die frühere Langmuth; es beansprucht mit Recht, auf jedem Platz genügend sehen und hören zu können. Es wachsen aufserdem in neuerer Zeit die Mafse öffentlicher Säle so erheblich, dafs alle in der Akustik gemachten Erfahrungen sorgsam zu Rathe gezogen werden müssen, um einen Mifserfolg zu vermeiden. Sind die Anordnungen verfehlt, ist die Schallentwickelung ungenügend oder gar störend, so wird auch die genialste Architektur den Schaden nicht wieder gut machen, im Gegentheil, die Verschwendung eines Prachtkleides an einen für seine Hauptaufgabe unbrauchbaren Raum um so bedauerlicher erscheinen lassen.

Aus diesen Erwägungen habe ich geglaubt, durch Veröffentlichug dieser Abhandlung meinen Fachgenossen einen Dienst zu erweisen. Von der allgemeinen Schalllehre ist darin nur das unmittelbar Nothwendige aufgenommen worden. Ebenso sind physikalisch mathematische Rechnungen, mit denen man bei den sehr verwickelten Verhältnissen vergeblich nach praktischen Erfolgen streben würde, auf das Unumgängliche beschränkt, dagegen, wo es zulässig erschien, vereinfachende Annahmen gemacht worden, ohne welche ein über-

sichtliches Verfolgen der Hauptsachen kaum ausführbar gewesen wäre.

Bis jetzt hatte es an einer festen Grundlage: an einer zuverlässigen Messung der Schallstärken gefehlt. Die Versuche Vierordt's waren mir unbekannt und wären mir unbekannt geblieben, wenn die Ergebnisse meiner eigenen Messungen mich nicht zu wiederholten Nachforschungen veranlaſst hätten. Die Beobachtung des Echos hatte die Unhaltbarkeit der Theorie, nach welcher die Schallminderungen sich verhalten sollen wie die Quadrate der Entfernungen, mir überzeugend klar gemacht. Die Messungen ergaben, daſs die einfachen Entfernungen und nicht deren Quadrate für die entsprechende Schallabnahme maſsgebend sind. Es folgte die Bestimmung einiger besonders wichtiger Reflektionsverluste. Damit war die Möglichkeit gewonnen, für die Beurtheilung der Schallvertheilung in einem gröſseren Raum einen gewissen zahlenmäſsigen Anhalt zu finden. Es wäre erwünscht, wenn diese Versuche wiederholt und auf sämmtliche in Betracht kommende Flächen ausgedehnt würden, um die Werthe möglichst genau festzustellen. Das Schluſsergebniſs wird indessen dadurch kaum erschüttert werden, da dasselbe unter dem Einfluſs der Schallinterferenzen steht. Die Wirksamkeit dieser Interferenzen schränkt die der Reflexe zwar ein, hebt sie aber durchaus nicht auf. Der Nachweis hierüber hat die Wahrscheinlichkeit der Thatsachen für sich.

Durch diese Hauptpunkte und durch mancherlei andere inzwischen gemachte Erfahrungen sind die 1889 in der „Szene der Alten und Bühne der Neuzeit“ vertretenen Ansichten über die Schallentwickelung vervollkommnet, erweitert, vor Allem

aber auf alle grofsen Innenräume ausgedehnt und durch die Schallmessungen auf ein mehr befestigtes Fundament gestellt worden.

Vielleicht regt meine Schrift diesen oder jenen Fachgenossen an, sich eingehender mit Akustik zu beschäftigen. Er wird mehr Freude daran finden, als er bei der scheinbar trockenen Materie erwartete. Wie das Auge, welches für Form und Farbe geschult ist, beim Betrachten eines Kunstwerks ein um so feineres Verständnifs, einen um so höheren Genufs hat, so auch wird dem Ohr, wenn es dafür geschärft ist, im Konzert, im Theater nach und nach so manche Tonempfindung klar, von deren Vorhandensein es früher keine Ahnung hatte.

# UEBERSICHT DES INHALTS.


| | | Seite |
|---|---|---|
| 1. | Entstehung des Schalls. Schallschwingungen | 1 |
| 2. | Tonschwingungen. Summationen kleinster Schallschwingungen | 2 |
| 3. | Schallgeschwindigkeit der Luft; anderer Mittel | 3 |
| 4. | Wellenlänge des Tons. Phasen. Knotenpunkte | 3 |
| 5. | Tonhöhe. Musikinstrumente | 4 |
| | Töne nie ohne Geräusch | 5 |
| | Klangfarbe. Grundton. Obertöne. Temperirte Stimmung | 5 |
| | Schallfarbe | 7 |
| | Menschliche Stimme. Redner. Schauspieler. Sänger | 7 |
| | Zungenpfeifen. Kehlkopf. Bruststimme. Fallsett. Kopfstimme | 8 |
| | Obertöne | 11 |
| | Umfang der Stimme; ihr Uebergewicht | 12 |
| | Gehör | 12 |
| | Das Ohr | 14 |
| | Das Hören. Hebelmechanismus der Gehörknöchelchen. Corti's Fasern. Einrichtung für sehr schwache und gegen sehr starke Schallwellen | 15 |
| | Unterschiede in der Kraft des Schalls. Reizschwelle | 18 |
| | Theorie vom Quadrat der Entfernungen. Widersprechende Erfahrung beim Echo | 19 |
| | Schallstärke. Schallmesser. Seitenhämmerchen. Fallstäbchen. Schwierigkeiten der Versuche | 20 |
| | Anderweite Schallmessungen. Vierordt. Schafhäutl. Oberbeck. Messung im geschlossenen Raume; im Freien | 24 |
| | Dieselben Stärkeabnahme-Bedingungen bei Tönen wie bei Geräuschen | 26 |
| | Die zweifache Amplitude der Schallschwingungen äufsert auch nur den zweifach stärkeren Reiz auf die Gehörnerven | 28 |
| | Nutzen des Fallstäbchens bei Beurtheilung der Schallentwicklung in gröfseren Räumen | 30 |
| | Reflexe | 33 |
| | Einfallwinkel. Reflexionswinkel. Parabel. Kreis. Ellipse. Langhans | 34 |
| | Reflexionsverluste | 35 |
| | Messen des Reflexionseffekts. Reihe der Reflexionswirkungen | 36 |
| | Glatter Wandputz als Lichtspiegel und als Schallspiegel | 37 |
| | Störende Reflexe glatter Putzwände | 39 |

Seite

§ 29. Bedeutung der Reflexe bei wachsender Entfernung von der Schallquelle 40
§ 30. Nachhall . . . . . . . . . . 41
§ 31. Silbendauer. Pausen. Zulässige Wegedifferenz . . . . . . . . . . 42
§ 32. Betonung. Uebergang zur nicht betonten Silbe . . . . . . . . . . 43
§ 33. Verständlichkeit des Vortrags. Geberden. Sorgfältige Aussprache der betonten Silben. Verhältniſs des Vortragtempos zur Gröſse des Raums. Gounod. Die Redekunst ein Erfahrungsresultat der Reflexwirkungen 45
§ 34. Die menschliche Stimme auf 20 m Entfernung als Grundmaſs. Die Gesammtwirkung der Reflexe die Wirkung des direkten Schalls überragend. Waldkirchen. Ausbildung der Wand- und Decken-Flächen in gröſseren Räumen . . . . . . . . . . 46
§ 35. Schallzerstreuende Wirkung der Reliefs . . . . . . . . . . 48
§ 36. Reliefirte Fläche. Gleiche Gesammtwirkung bei verschiedenem Maſsstab der Reliefs . . . . . . . . . . 50
§ 37. Gesammtwirkung einer reliefirten Wandfläche . . . . . . . . . . 51
§ 38. Die für die Reflexion erforderlichen und die überflüssigen Zonen der Reliefs. Flache Reliefs . . . . . . . . . . 52
§ 39. Einschränkung der Reflexwirkung . . . . . . . . . . 53
§ 40. Reflexwirkung der Zuschauerreihe . . . . . . . . . . 54
§ 41. Akustik der antiken Theater. Minderung der Wirkung bei Zuschauerreihen auf einer Ebene . . . . . . . . . . 55
§ 42. Schallverbreitung in einem Saale von 1800 Quadratmeter Grundfläche. Intensität der Reflexwirkung aus den Zuschauerreihen. Gesammtwirkung für den entferntesten Sitzplatz . . . . . . . . . . 55
§ 43. Mehrmalige Schallbrechung . . . . . . . . . . 60
§ 44. Interferenzen . . . . . . . . . . 61
§ 45. Mehrfacher Nutzen der Ueberhöhung der Zuschauerreihen. Die Fabel von den akustisch günstigen Verhältniſszahlen für Länge, Breite und Höhe eines Saales . . . . . . . . . . 69
§ 46. Resonanz. Erdboden. Fuſsboden. Eigenschall resonirender Körper. Resonanz der Bautheile . . . . . . . . . . 71
§ 47. Alterthum. Podium zu Pella. Klanggefäſse des Vitruv . . . . . . . 72
§ 48. Streichinstrumente. Mittelalter. Amati. Stradivari. Garneri. Vorzüglichkeit neuer Geigen . . . . . . . . . . 74
§ 49. Henry's Versuche. Der Sinus des Elevationswinkels als Maſs der Verstärkung bei einer resonirenden Fläche . . . . . . . . . . 75
§ 50. Geigenkasten . . . . . . . . . . 76
§ 51. Resonanz der Straſsenoberfläche; der Bühnenpodien. Neigung des Podiums 78
§ 52. Rednertribünen. Kanzeln. Die Nische des Podiums im Trocadero zu Paris 79
§ 53. Resonanz von Fuſsboden, Wänden und Decke eines Zuschauerraums . 81
§ 54. Das Passionsspielhaus in Oberammergau . . . . . . . . . . 82
§ 55. Praktische Fälle. Flächen eines Saales . . . . . . . . . . 83
§ 56. Deckenflächen . . . . . . . . . . 84
§ 57, 58. Rückwand . . . . . . . . . . 86
§ 59. Schalldeckel . . . . . . . . . . 87

## § 1.

### Entstehung des Schalls. Schallschwingungen.

Wenn Körper auf einander durch Stofs, Druck, Zug oder Reibung wirken, gerathen sie in Schwingungen, welche sich durch die angrenzenden Mittel: gew. Luft (Erdboden, Wasser) nach allen Seiten hin mit gleichmäfsiger Geschwindigkeit fortpflanzen und, falls sie unsre Gehörnerven zu reizen stark genug sind, Schall genannt werden. Der Schall ist Folge eines mechanischen Vorgangs. Schlägt ein Holzhammer auf eine Holzplatte, so drücken sich die Fasern der getroffenen Stellen bei Hammer und Platte zusammen; aufserdem giebt die Platte dem Schlage nach, biegt sich ein und geräth in elastische und damit zugleich in akustische Schwingungen. Schlägt derselbe Hammer mit derselben Kraft statt auf eine Platte auf einen ebenso schweren Holzwürfel, so ist der Schall sehr viel weniger stark. Seiner Form wegen ist die Einbiegung des Holzwürfels an der getroffenen Stelle nach mechanischen Gesetzen sehr viel geringer, daher auch die Schallschwingungen viel weniger kräftig. Sie werden zugleich dadurch verringert, dafs die schwingende Fläche weit kleiner ist, als bei der Holzplatte. Im allgemeinen darf man annehmen, dafs ein Körper, je geringer seine Dicke, je gröfser aber seine Flächenausdehnung und seine Elastizität ist, um so lauter schallt. Es bedarf wohl kaum der Erwähnung, dafs bei den obigen Beispielen nicht allein die Platte und der Klotz, sondern immer auch der andere Körper, der Hammer, einen Schal-

hören läfst. Aus ähnlichen oder mehrfachen solcher ähnlichen Vorgängen entsteht der Schall, in diesen Fällen auch Geräusch oder Lärm genannt, mit dem ein Eisenbahnzug über eine Gitterbrücke „rasselt“, ein Lastwagen auf dem Pflaster „rollt“ die Wellen gegen eine Quaimauer „klatschen“ und der Wind in den Schlüssellöchern „pfeift“ oder in den Schornsteinen „heult“.

§ 2.

Tonschwingungen. Summationen kleinster Schallschwingungen.

Wird der Mittelpunkt einer Saite durch eine Kraft gezogen und dann freigelassen, so schwingt die Saite eine Zeit lang hin und her. Die Entfernung des Mittelpunkts von der Ruhelage — der Ausschlag oder die Amplitude der Schwingungen — wird immer kleiner, bis die Saite in Ruhe kommt. Trotz der abnehmenden Ausschläge ist die Zeiteinheit der Schwingungen immer dieselbe. Solche regelmäfsigen Schwingungen von stets gleicher Einzeldauer nennt man einen Ton zum Unterschiede vom Geräusch, von dem man anzunehmen pflegt, dafs es aus unregelmäfsigen Schwingungen zusammengesetzt sei. Nachdem der Ton der Saite erloschen zu sein scheint, dauern die Schwingungen, dem Auge nicht mehr erkennbar, mit unendlich kleinen Ausschlägen noch geraume Zeit fort. Nähert man den Finger, so fühlt man besonders deutlich bei den mit Draht übersponnenen Bafssaiten das Zittern dieser stummen Schwingungen. Unser Gehör ist nicht mehr fein genug, diese zarten Tonschwingungen zu empfinden. Ebenso giebt es leise Geräusche, welche uns entgehen. Die ersten einzelnen Regentropfen, obwohl sie die gröfsten zu sein pflegen, hören wir nicht fallen; wohl aber den Platzregen, der auf Dächer und Pflaster herniederrauscht. Wir hören nicht das einzelne Blatt vom Baum herab schweben, wohl aber im Herbst jenes eigenthümliche Knistern im Walde, mit dem die Blätter in Menge zu Boden sinken. Es soll später gezeigt werden, wie in ganz gleicher Weise schwache Schallreflexe sich zu erheblichen Wirkungen summiren können.

## § 3.
### Schallgeschwindigkeit der Luft. Schallgeschwindigkeit anderer Mittel.

Die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall in der Luft fortpflanzt, ist schon vor mehr als 200 Jahren durch Mersenne und dann durch Kircher annähernd genau auf etwa 1000 Fuſs in der Sekunde angenommen worden. Seit dieser Zeit haben die Versuche, die Geschwindigkeit zu messen, nicht aufgehört. Bekannt sind die Messungen am 21. und 22. Juni 1821 bei Paris durch A. v. Humboldt, Gay-Lussac, Bouvard, Prony, Mathieu und Arago. Die Beobachtung bei Kanonenschüssen in Montlhery einerseits und in Villejuif anderseits ergab eine Geschwindigkeit für die Sekunde bei 0 Grad von 1019 Pariser Fuſs. In neuerer Zeit hat Regnault in der Ebene von Satory bei stiller Luft in ähnlicher Weise 1020,2 Pariser Fuſs = 331,37 m für die ersten 4000 Fuſs, und für die folgenden 1018,9 Fuſs = 330,7 m festgestellt. Nach weiteren Beobachtungen von Regnault und Dr. König darf man annehmen, daſs tiefe Töne sich etwas rascher als höhere fortpflanzen. Der Grundton einer Trompete wurde zuerst, dann nach einander die Obertöne gehört. Für höhere Temperaturen berechnet sich die Geschwindigkeit $v = 331{,}4 \sqrt{1 + 0{,}0037\, t}$. Hierin bedeutet $t$ die Temperatur in Graden Celsius und 0,0037 den Ausdehnungskoeffizienten der Luft für 1 Grad Celsius. In öffentlichen Versammlungsräumen, Theatern, Konzertsälen ist bei 20 Grad Celsius also $v = 343{,}33$ m. Die Schallgeschwindigkeit beträgt in anderen Mitteln: in Kohlensäure 0,8; in Wasserstoff 3,8; in Blei 4,0; in Wasser 4,3; in Eisen 15,0; in Glas 15,5; in Tannenholz 12,0 bis 18,0 der Schallgeschwindigkeit in der Luft.

## § 4.
### Wellenlänge des Tons. Phasen. Knotenpunkte.

Aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls für die Sekunde in der Luft und aus der Zahl der Einzelschwingungen, welche eine Saite in einer Sekunde macht, läſst sich nun die Länge der auf die Luft übertragenen Tonschwingungen be-

rechnen. Macht die Saite (a') 440 Doppelschwingungen in der Sekunde, so wird mit den Tonschwingungen in der Luft ein Weg ausgefüllt von 343,33 m, und da die Schwingungen alle einander gleich sind, beträgt die Länge der Doppelschwingung $\frac{343,33}{440} = 0,79$ m. Bei der ersten Schwingung prefst die Saite die Luft in der Schwingungsfläche zusammen, bei der zweiten Schwingung thut sie das Entgegengesetzte, sie dehnt die Luft aus. Die Doppelschwingung eines Tones besteht daher in der ersten Hälfte aus einer verdichteten, in der zweiten aus einer verdünnten Luftschicht. Man nennt diese beiden Einzelschwingungen auch positive und negative Phase und stellt sie bildlich dar (Fig. 1) als zwei Kreisbogen über und unter der Gleichgewichts- oder Null-Linie. *ac* ist die Länge der Doppelschwingung; *ab* die Länge der positiven, *bc* die der negativen Phase. In den Punkten *a*, *b*, *c* der Nulllinie ist weder Verdichtung noch Verdünnung. Diese Gleichgewichtspunkte heifsen Knotenpunkte. Die Bogenhöhen *de*, *fg* stellen die sogenannten Amplituden und damit das Kraftmafs der Schwingung dar.

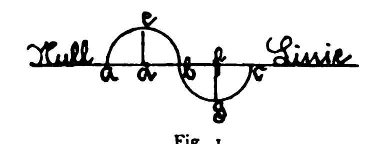


Fig. 1.

## § 5.
### Tonhöhe. Musikinstrumente.

Von der Zahl der Schwingungen eines Tones hängt seine Höhe ab. Als Grundlage gilt bei uns das a' mit 440 Doppelschwingungen. Die tiefere Oktave a hat 220, A 110, A, 55; die höhere Oktave a'' 880, a''' 1760, a'''' 3520 Doppelschwingungen in der Sekunde. Die Zahlen der anderen Töne der Tonleiter reihen sich zwischen obige Zahlen ein.

Mit Tönen hat die Natur nur den Gesang der Vögel ausgestattet, die bei den ersten wahrscheinlich nicht sehr erbaulichen Singversuchen der Menschen als Lehrmeister gedient haben mögen. Die Töne der Musikinstrumente sind Kunsterzeugnisse. Die tönenden Körper derselben: Darmsaiten,

Stahlsaiten, tannene Resonanzböden, das Holz und Blech der Blasinstrumente, wie die schwingenden Luftsäulen darin sind sämmtlich von hoher Elastizität. Sehr elastisch sind auch die regelmäfsig geformten Stäbe aus Stahl, Holz oder Glas der Schlaginstrumente: Glockenspiel, Holz- und Glasharmonika.

## § 6.

### Töne nie ohne Geräusch.

Die Kunst des Instrumentenbaues ist aufserordentlich weit gefördert; trotzdem haben ihre Erzeuguisse es nicht dahin bringen können, einen völlig reinen Ton, d. h. einen Ton ohne jedes Nebengeräusch, zu bilden. An diesem Geräusch ist gewöhnlich der mechanische Vorgang, der die Schwingungen des tönenden Körpers zur Folge hat, hervorragend betheiligt. Die Hämmer der Klaviere und der Schlaginstrumente verursachen ein klapperndes Geräusch, das den Ton der Saiten oder Stäbchen begleitet. Bei den Streichinstrumenten hört man das Reiben des Bogens auf den Saiten; bei den Flöten den Stofs der Luft am Mundloche, bei den anderen Blasinstrumenten das Schlagen der Ventile. Der Ton der hölzernen Fagots, Klarinetten und Oboes ist wesentlich verschieden von dem Schmettern des Blechs bei Hörnern und Trompeten. Das Material, welches mitschwingt, macht seine Eigenthümlichkeiten geltend. Nur an diesen Nebengeräuschen erkennt man bei gleich hohen Tönen, von welchem Instrumente sie herrühren. Diese Beimischung, welche die Töne hindert, ideal vollkommen zu klingen, giebt ihnen indessen Charakter und der Instrumentalmusik eine Abwechselung, ohne die sie langweilig und ermüdend wirken würde.

Kleine Unvollkommenheiten machen eine Schönheit erst anziehend, wie kleine Charakterschwächen eines grofsen Mannes ihn uns menschlich näher bringen.

## § 7.

### Klangfarbe. Grundton. Obertöne. Temperirte Stimmung.

Fast alle Töne treten als eine Zusammensetzung mehrerer Töne, als ein Klang auf. Die Zusammensetzung entscheidet

die Farbe oder den Timbre des Klanges. Eine in ihrer ganzen Länge schwingende Saite ist im Stande, dabei zugleich in ihren Hälften, Dritteln, Vierteln u. s. w. zu schwingen. Man braucht an den betreffenden Knotenpunkten nur den Finger behutsam zu nähern, um diese Theilschwingungen entstehen zu lassen. Der Ton der ganzen Saitenlänge heifst der Grundton, der der Theilschwingungen der erste, zweite, dritte u. s. w. Oberton. Der erste Oberton — in unserer sogenannten temperirten Tonfolge der achte — heifst bekanntlich die Oktave. Bei Instrumenten mit fest bestimmten Tönen, z. B. Klavieren, ist eine Oktave zur Vereinfachung des Mechanismus in zwölf Tonstufen: acht ganze und fünf dazwischen liegende halbe Töne getheilt. Die Theilung kann nur für eine Tonart genau richtig gemacht werden, trifft dann aber für die anderen Tonarten nicht mehr genau zu. Um Härten zu vermindern und die zwölf Tasten für alle Tonarten brauchbar zu machen, hat man ihnen eine für alle Fälle vermittelte temperirte Stimmung gegeben. Dadurch kommt es, dafs der siebente und elfte Oberton, wenn sie mathematisch genau entwickelt werden, aus der temperirten Tonreihe herausfallen, also mit derselben eine Dissonanz bilden. Hiervon wird bei der menschlichen Stimme die Rede sein. Die Instrumente bilden selten so hohe Obertöne. Noch seltener aber ist ein Grundton ohne Obertöne. Ein solcher nahezu reiner Grundton findet sich nur beim Piano der Flöten und gedackten (unten geschlossenen) Orgelpfeifen. Im übrigen ist der Grundton immer von Obertönen begleitet, deren jedesmalige Zusammensetzung dem Klange seine Klangfarbe und damit seinen besonderen Charakter giebt, welcher jenen reinen Grundtönen mangelt. Sie klingen zu weich, daher ausdruckslos und langweilig. Bei der Orgel giebt es ein Register, vox humana, welches durch eine entsprechende Zusammensetzung der Pfeifen die Klangfarbe der menschlichen Stimme darstellt. Wer dies Register auf der berühmten Orgel im Dom zu Freiburg in der Schweiz gehört hat, mufs zugeben, dafs der Klang mit vollendeter Täuschung wirkt.

Ein Klang besteht also immer aus Tönen, die ein gemein-

sames Grundmaſs haben. Aus graden Theilungen der Gesammtklänge einer Saite entstehen deren Obertöne.

## § 8.
### Schallfarbe.

Wirken Schallwellen zusammen, die ein solches Grundmaſs nicht haben, so entsteht ein Geräusch. Jede Schallwelle für sich kann dabei ein Ton sein, wie man am besten erfährt, wenn man sämmtliche zwölf Halbtöne der kleinen Oktave auf dem Klavier herniederdrückt. Es entsteht ein Geräusch, welches nur noch eine sehr geringe Beimischung von Tönen zu haben scheint. In der That sind jedem Geräusch Klänge beigemischt, die zu erkennen allerdings nicht Jeder befähigt ist. Dem geübten Ohr werden sie offenbar im Brausen des Sturmes, im Rauschen der Brandung, im Rasseln des Eisenbahnzuges, wenn hierbei die Stärke und Färbung der Klänge auch vielfach wechselt. Wird eine Holzplatte von einem Hämmerchen mit verschiedener Geschwindigkeit aber immer an derselben Stelle getroffen, so kann man sich überzeugen, daſs die Stärke des Schlages zwar wechselt, daſs das Mischungsverhältniſs der Schallwellen jedoch stets dasselbe bleibt. Der Schall besitzt also auch seine Schallfarbe. Dies scheint nicht allzu überraschend, denn ein regelmäſsig bearbeiteter Holzstab hat neben dem Klappern noch einen deutlichen musikalischen Klang.

## § 9.
### Menschliche Stimme. Redner. Schauspieler. Sänger.

Von allen Schallquellen ist für unsere Betrachtungen die menschliche Stimme die bei weitem wichtigste. Ihre Kraft und ihr Wohllaut ist von der körperlichen Beschaffenheit und von der Sorgfalt abhängig, mit der sie in ihrer Entwickelung ausgebildet worden ist. Gute Ernährung und mildes Klima scheinen Bedingungen für ihr Gedeihen zu sein. Der Süden Europas zeigt eine Fülle guten Stimmmaterials; dem Norden ist es spärlicher beschieden. Wer nicht mit einem kräftigen und ausdauerndem Organ begabt ist, sollte nicht Kanzel- oder

Parlamentsredner sein wollen. Für eine gröfsere Zahl von Zuhörern wird sein Vortrag zur Qual. Noch höhere Ansprüche müssen an den Schauspieler und an den Sänger gemacht werden. Bei ihnen ist aufser Kraft und Ausdauer auch noch der Wohllaut erforderlich. Schon in altgriechischer Zeit wurde das gröfste Gewicht darauf gelegt, die Stimme durch richtige Behandlung mächtig und klangvoll zu gestalten. Der Lehrer für solche Ausbildung hiefs dann zur Kaiserzeit φωνασκός. Wie wären sonst auch die Tragöden im Stande gewesen, den Riesenraum eines antiken Theaters zu beherrschen? In dieser Kunst war die alte Zeit der heutigen sehr überlegen. Jetzt wird ein Schauspieler schon besorgt, wenn er in einem Saale vor 1500—2000 Zuschauern auftreten soll. Er wünscht ein sehr viel kleineres Auditorium für sein „intimes" Spiel; da braucht er seine Stimme nicht anzustrengen. „Hohe Gage" ist seine Losung in dem Luxustheater, dessen Sammtsitze nur reichen Leuten zugänglich sind. Dafs einst die Festaufführungen zur Ehre der Gottheit stattfanden, dafs die Schauspieler als Verkünder ewiger Wahrheit die Seele zu erheben hatten, dafs sie für das ganze Volk spielten, dafs ihr hoher Beruf sie geheiligt und unverletzlich machte — das ist ja mehr als 2000 Jahre her, so dafs es „kaum mehr wahr", jedenfalls aber längst vergessen ist. Heute ist das Schauspiel „Kaviar fürs Volk". Zweifellos lassen sich Brust und Stimmbänder zu ähnlicher Kraft, zu ähnlicher Vollkommenheit auch in unserer Zeit wie damals in Griechenland ausbilden. Davon können die Berufsschauspieler sich bei den Bauern in Oberammergau überzeugen. Trotz der Beimischung von Dialekt bleiben diese in dem Festspiel den 4000 Zuhörern bis auf den letzten Platz verständlich!

## § 10.

**Zungenpfeifen. Kehlkopf. Bruststimme. Falsett. Kopfstimme.**

Das menschliche Organ ähnelt in seiner Einrichtung den Blasinstrumenten. In Musikstücken wird der Ersatz des Gesangs gewöhnlich dem Horn oder der Klarinette übertragen.

Recht anschaulich ist auch der Vergleich mit den Zungenpfeifen der Orgel. Unter Zunge versteht man eine schmale, dünne, elastische Metallplatte, welche mit einer Schmalseite vor einer gleichgeformten Oeffnung befestigt ist. Ist die Oeffnung ein wenig kleiner, so schlägt auf ihre Ränder die bewegte Zunge auf; ist sie ein wenig gröſser, so schlägt die Zunge durch. Heute sind gewöhnlich durchschlagende Zungen im Gebrauch. In Fig. 2 tritt die Luft aus der Windlade von unten in den Pfeifenkasten *a* ein und entweicht von dort durch das Rohr *b* nach dem Schalltrichter *c*. Die Zunge *d* wird hierbei in Schwingungen versetzt, deren Zahl mit der der Schwingungen des Hohlraums *a* übereinstimmen muſs. Mit dem beweglichen Stimmdraht *e* kann die Schwingungsdauer der Zunge verändert und diese Uebereinstimmung herbeigeführt werden. Durch den Schalltrichter wird der Ton verstärkt. Bei Klarinette, Fagot und Oboe sitzen im Mundstücke elastische Rohrplättchen als Zungen, welche den Ton angeben, dessen Kraft jedoch hauptsächlich auf der in diesen Instrumenten schwingenden Luftsäule beruht. Bei der Mundharmonika bringen umgekehrt die Metallzungen fast allein den Ton hervor. Zwischen diesen beiden Extremen stehen die Zungenpfeifen der Orgel in der Mitte. Die Hörner, Posaunen, Trompeten werden mittels der Vibrationen der Lippen zum Tönen gebracht. Die Lippen sind hier also die membranösen Zungen, die die Töne gleichsam wecken, welche dann im Instrumente mit voller Stärke auftreten.

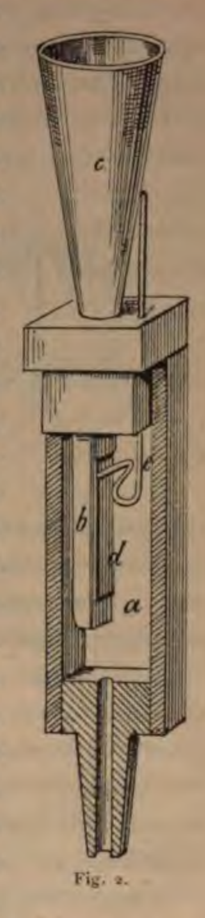


Fig. 2.

Im menschlichen Kehlkopf haben die Stimmbänder dieselbe Funktion membranöser Zungen, welche dem Ton Höhenlage, Kraft und Wohllaut geben. Die Luft in Mund, Hals und Luftröhre schwingt verstärkend mit. Die wechselnde Form der

Mundhöhle bildet die Vokale und ändert die Klangfarbe. Zunge, Lippen und Zähne erzeugen das Geräusch der Konsonanten. Die Mundöffnung dient weiter noch als kräftiger Schallbecher. Die Tonbildung geschieht ganz ähnlich wie bei den Zungenpfeifen. Durch die Muskeln der Brust wird die Luft aus der Lunge durch die Luftröhre gepreſst. Sie muſs die Stimmritze passiren und setzt dabei die Ränder derselben, die Stimmbänder in Schwingungen. In Fig. 3 bedeutet der dunkle Spalt die Stimmritze. Die Stimmbänder *cc* sind vorn an dem Schildknorpel *bb* befestigt und können mittels der beiden Gieſskannenknorpel, deren Muskeln die verschiedenartigsten Bewegungen erlauben, bald weniger, bald mehr nach der Mitte zu gefaſst und angespannt und die Stimmritze dementprechend zu einem feinen Spalt von veränderlicher Länge gestaltet werden, je nachdem die Gieſskannenknorpel vor- oder rückwärts gehen, sich gegenseitig nähern oder drehen Die Zahl der Schwingungen unterliegt dabei ähnlichen Gesetzen wie bei den Saiten. Die Zahlen verhalten sich wie die Wurzeln aus den spannenden Kräften, aber umgekehrt wie die Längen und Dicken; sie wachsen, je mehr die Stimmritze sich verkürzt, je mehr dabei die Stimmbänder straffer gezogen und dünner werden. Soll sich ein reiner Ton bilden, so müssen auch die Stimmbänder, die die Ränder der Stimmritze bilden, gesund, elastisch und rein sein. Unebenheiten, kleine Knötchen, wie sie bei Entzündungen auftreten, machen auch den Ton unrein und heiser. Man unterscheidet Bruststimme und Falsett oder Fistelstimme. Der Brustton zeichnet sich durch markigen Klang aus; er umfaſst den ganzen natürlichen Umfang der Stimme. Als Erweiterung nach der Höhe lassen Tenöre dann wohl noch eine Reihe von Falsetttönen folgen, deren Klangfarbe jedoch gewöhnlich reizlos und nüchtern ist. Bei dem Brustton schwingt der ganze Apparat: Stimmbänder, die Luft in Mund, Hals und

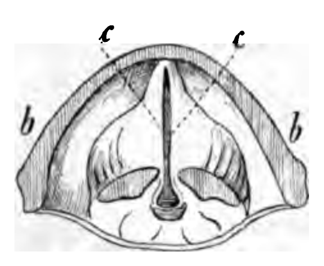


Fig. 3.

Luftröhre. Von den letzteren besonders kräftigen Schwingungen kann man sich überzeugen, wenn man die Hand auf die Brust legt. Die Vibrationen sind sehr deutlich fühlbar; sie verschwinden beim Uebergang ins Falsett. Aufserdem schwingen beim Falsett nur die äufsersten Ränder der Stimmbänder, also nur ein Theil der letzteren. Um den nicht immer angenehmen, gewöhnlich schluchzenden Uebergang vom Brustton ins Falsett zu vermeiden und doch an Höhe zu gewinnen, bilden die Tenoristen die sogenannte Kopfstimme aus, welche in ihrer Beschaffenheit zwischen Brustton und Falsett liegt und deren Umfang je nach der Disposition des Sängers variabel ist.

### § 11.
### Obertöne. Kulissenreifsen.

Die Obertöne der menschlichen Stimme entstehen durch Theilungen der Stimmbänder, durch Theilungen der schwingenden Luftkörper, durch Veränderung der Mundhöhle, durch Heben und Senken des Kehlkopfs. Die Stimme kann nach Helmholtz die grofse Zahl von sechzehn Obertönen hervorbringen; dadurch ist sie im Stande, eine überaus reiche Stufenleiter von Klangfarben für jede Regung des Gefühls zu bilden. Allerdings ist nicht jedes Organ hierzu befähigt. Was der Eine mühelos von der Natur gewährt erhielt, kann der Andere selbst durch eisernen Fleifs nicht erwerben. Bei gutem Stimmmaterial wird es dem Redner, dem Schauspieler, dem Sänger gelingen — wenn er mit seiner ganzen Seele bei der Sache ist — den rechten Ton, d. h. die richtige Klangfarbe zu treffen. Allmählich aber erfolgt die Handhabung des Ausdrucks nur zu leicht mit einer Art maschineller Sicherheit. Dieses „Kulissenreifsen" auf der Bühne ist dasselbe, was man in andern Künsten Manier nennt. — Die modernen Gesanglehrer sündigen vielfach, indem sie die Stimme bei der Ausbildung zu sehr anstrengen, häufig auch Leistungen verlangen, die durch die natürliche Veranlagung der Stimme versagt sind. Diese Veranlagung zu erkennen und zur Vollendung zu bringen, das ist der „Doktor-

blick“, der leider auf diesem Gebiet noch seltener zu sein scheint, wie in der Medizin.

§ 12.

Umfang der Stimme. Uebergewicht der Stimme.

Die menschliche Stimme umfaſst fünf Oktaven, von der groſsen bis zur dreigestrichenen kleinen Oktave, reicht aber gewöhnlich nur von dem F mit 88 Doppelschwingungen des Baſs bis zum g″ des Sopran mit 792 Doppelschwingungen. Eine Stimme von zweieinhalb Oktaven ist schon umfangreich. Ausnahmen mit drei bis dreieinhalb Oktaven hat es zu allen Zeiten gegeben. Kapellmeister Forster sang das Contra-A, mit 55 Doppelschwingungen; die Gebrüder Fischer sollen sogar das F, mit 44 Doppelschwingungen gesungen haben. Die Stimmen der Nilsson und der Carlotta Patti reichen weit in die dreigestrichene Oktave; der junge Mozart hörte 1770 in Parma die Lucrezia Ajugari das c'''' singen. Solche phänomenalen Leistungen gehören eigentlich mehr in das Gebiet des Absonderlichen wie des künstlerisch Schönen. Dem Ohre sind die Töne von der groſsen bis zur zweigestrichenen Oktave die angenehmsten; was darunter reicht, hat bereits etwas Rauhes, Knarrendes; was darüber hinausgeht, wirkt auf das Gehör empfindlich bis zur Unerträglichkeit. Das e' des Basses hat als siebenten Oberton bereits d'''', und die folgenden Theiltöne reichen noch weiter in die viergestrichene Oktave. Noch viel kräftiger wirkt die Beimischung hoher Obertöne daher beim Tenor und Sopran und giebt so der menschlichen Stimme das Uebergewicht über alle Instrumente des Orchesters.

§ 13.

Gehör.

Ebenso nothwendig wie die Kenntniſs der Stimmbildung ist die Untersuchung der Schallwirkung auf das Gehör. Nur bei tiefer Stille und ruhiger Luft kann man weit und scharf hören. Bei stürmischer See muſs man am Strande sich in die Ohren schreien, um verstanden zu werden. Ist Windstille und

das Meer ein glatter Spiegel, so vernimmt man auf weite Entfernung über dasselbe hinweg ein mäſsig laut gesprochenes Wort. Sehr starke und unregelmäſsige Schallwellen beeinträchtigen also die Wirkung schwächerer Schallwellen auf das Ohr. Pauke und Becken übertönen und ersticken alle anderen Instrumente des Orchesters. In ihrem Lärm geht selbst die Stimme des Sängers unter, die bis dahin eine ganze Kapelle von 60—80 Musikern beherrschen konnte. Die dröhnenden Schläge betäuben das Ohr und machen es gegen alles Andere unempfindlich, während es sonst das Zusammenspiel wie zugleich alle Feinheiten eines Sextetts, des Chors und sämmtlicher begleitenden Instrumente mit Genuſs und ohne Anstrengung verfolgen kann. Dabei hat jede Note, wie eine Schar von Trabanten, ihre Obertöne, und alle diese direkten Töne noch eine tausendfache Zahl von Reflexen, die von allen Flächen, Vorsprüngen und Gliederungen, von jedem körperlichen Ornament nach dem Zuhörer hingeleitet werden. Das Auge dagegen kann nur nacheinander den Gesammteindruck und dann Einzelheit für Einzelheit, nie alles zusammen mit einem Blick erfassen. Mit zwei Augen sehen wir zwei Bilder und dadurch das Körperliche, sonst aber nicht schärfer als mit einem. Mit zwei Ohren hören wir doppelt so viel, als mit einem. Hält man das eine Ohr auch nur oberflächlich im Konzert zu, so sinkt zugleich der Eindruck der Musik auf die Hälfte. Jedes Ohr empfängt seinen Eindruck, der von dem andern nur um ein weniges sich unterscheidet, ähnlich wie die zwei Bilder eines Stereoskops. Die Endigungen der Gehörgänge befinden sich an den Enden des Kopfdurchmessers, damit wir vor- und rückwärts hören können. Zugleich ist damit eine Art Standlinie gewonnen, um den Ort des Schallursprungs zu beurtheilen. Täuschungen hierbei werden immer durch Reflexe herbeigeführt. Wir hören vorzugsweise mit den Ohren, dann aber auch mit dem ganzen Körper; je näher dem Sitz des Gehörs, um so besser. Schlieſst man Ohren, Mund und Nase auch noch so vollständig, man kann dennoch jedes in demselben Raume mäſsig laut gesprochene Wort verstehen.

Wird über oder unter uns Klavier gespielt, so verstärken sich die Töne erheblich, wenn man nur die Stirn an die entsprechende Wand legt.

## § 14.
### Das Ohr.

Man unterscheidet am Ohr (Fig. 4) als äuſseren Theil die Ohrmuschel *a* und den Gehörgang *b*, welcher durch das Trommelfell *c* von dem mittleren Theil, der Paukenhöhle *d*, getrennt ist. In der Paukenhöhle befinden sich die Gehörknöchelchen: der Hammer *e*, der Amboſs *f* und der Steigbügel *g*. —




Fig. 4.

Hierauf folgt der innere Theil, das Labyrinth, geschieden von der Paukenhöhle durch eine Knochenwand, welche nur zwei Oeffnungen hat, das ovale Fensterchen *h* und das runde *i*, beide durch eine Membran geschlossen. Auf der Mitte des Trommelfells ist der Hammerstiel, auf der Membran des ovalen Fensterchens die Fuſsplatte des Steigbügels festgewachsen

und so die Verbindung zwischen dem Gehörgang und dem Labyrinthe hergestellt. Letzteres ist mit einer Flüssigkeit, dem Gehörwasser, gefüllt; es besteht aus dem Vorhof *k* mit den drei bogenförmigen Kanälen *l* und der Schnecke *m*. Endlich hat die Paukenhöhle noch eine Verbindung mit der Mundhöhle durch einen Gang, die Eustachische Röhre *n*.

### § 15.

#### Das Hören. Hebelmechanismus der Gehörknöchelchen. Corti's Fasern. Einrichtung für sehr schwache und gegen sehr starke Schallwellen.

Die Thätigkeit des Hörens kann man sich nun folgendermaſsen vorstellen. Die Ohrmuschel, deren Bedeutung vielfach zu gering angeschlagen wird, fängt die Schallwellen auf und führt sie durch den Gehörgang dem Trommelfell zu, dessen flachtrichterförmige Spitze sie auf den Stiel des Hammers konzentrirt. Durch einen Hebelmechanismus überträgt der Hammerkopf die Erschütterungen auf den Amboſs und dieser sie auf den Steigbügel. Die Schwingungen des Hammerstiels haben eine viermal gröſsere Amplitude, als die Schwingungen der Fuſsplatte des Steigbügels, so daſs letztere mit wesentlich gröſserer Kraft der Membran des ovalen Fensterchens und hierdurch dem Gehörwasser des Labyrinths mitgetheilt werden. Da Oscillationen, die aus der Luft in ein dichteres Medium, hier also in das Gehörwasser, übergehen, immer einen Widerstand zu überwinden haben, scheint der damit verknüpfte Verlust durch jene Hebelübertragung wieder ausgeglichen zu werden. Die Schwingungen pflanzen sich nun mittels des Gehörwassers (also viermal schneller als in Luft) durch Vorhof, halbkreisförmige Kanäle und die Schnecke fort. Der Gang der Schnecke ist in seiner ganzen Länge durch eine theils knöcherne (lamina spiralis), theils häutige (membrana basilaris) Spiralfläche getheilt. Letztere wird auch membranöse Scheidewand oder Grundmembran genannt. Ueber der Grundmembran stehen, einen dreieckigen Kanal bildend, auſserordentlich zarte Gebilde, die der Marchese Corti zuerst unter-

sucht und beschrieben hat. Die Zahl dieser „Corti'schen Fasern" ist gröſser als 3000. Neben diesen Fasern endigen über der Grundmembran sowie in den häutigen Gebilden des Vorhofs und der halbkreisförmigen Kanäle die letzten feinen Ausläufer des Hörnervs. Die vereinigten Stränge des Hörnervs münden im untersten und hintersten Theil des Gehirns ein, wo das Rückenmark sich anschlieſst. Die Grundmembran besteht aus feinen Fasern, deren Richtung radial zur Schneckenlinie steht und deren Länge vom Vorhof bis zur Schneckenspitze auf das zwölffache anwächst. Die beiden Theile, in welche der Schneckengang durch die lamina spiralis und die Grundmembran getheilt wird, heiſsen die Vorhoftreppe und die Paukentreppe. Die Schwingungen des Gehörwassers laufen vom Vorhofe die Vorhofstreppe bis zur Spitze entlang und treten hier durch eine schmale Oeffnung in die Paukentreppe ein, auf welcher sie bis zum runden Fensterchen zurückkommen. Durch diese Hin- und Herbewegung, durch diesen auf die Nervenausläufer im ganzen Labyrinthe ausgeübten Druck und Zug werden im Gehirn die Empfindungen des Schalls ausgelöst. Helmholtz nimmt an, daſs die Schnecke die regelmäſsigen Wellen, die Töne, daſs der Vorhof und die drei halbkreisförmigen Kanäle die nnregelmäſsigen Schwingungen, das Geräusch, Getöse und den Lärm übermitteln. Den verschieden langen Fasern der Grundmembran miſst er eine ähnliche Wirkung bei, wie den Saiten einer Harfe oder eines Klaviers. Stimmt die Schwingungszeit einer solchen Faser mit der des Schneckenwassers überein, so wird die Faser mitschwingen und die Empfindung dieses Tons dem Gehirn durch die beigelagerten Nervenendigungen mittheilen. In den Häuten des Vorhofs finden sich einzelne Ablagerungen kleiner Kristalle, die Gehörsteinchen oder der Gehörsand, ebenso in den flaschenförmigen Ansätzen der Kanäle feine Härchen, deren Reibung bei den Schwingungen zur Erhöhung des Nervenreizes, wie man glaubt, beitragen. Da jedes Geräusch mit Tönen vermischt ist, da man sogar ein Geräusch vollständig aus Tönen zusammensetzen kann, deren Schwingungszahlen nur kein gemeinsames

ohne Bruch aufgehendes Grundmafs zu haben brauchen, wird ein Geräusch nicht nur durch Vorhof und Kanäle, sondern immer auch durch die Schnecke auf das Gehör wirken. Ebenso mufs andererseits jede regelmäfsige Welle nicht nur auf die Schnecke, sondern auch auf Vorhof u. s. w. ihren Reiz ausüben. Und doch kann das Labyrinth unmöglich ein einfacher Mechanismus zum Zählen der Schwingungen sein; seine einzelnen wunderbar gegliederten Theile müssen doch auch besondere Aufgaben zu erfüllen haben. Wie merkwürdig sind die drei bügelförmigen Kanäle, deren Ebenen immer auf einander senkrecht stehen! Da die Schallwellen nicht allein durch die Luft und die Gehörgänge, sondern auch durch die Kopfknochen vermittelt werden, wäre die Annahme nicht unberechtigt, dafs diese beiden Kanalbündel rechts und links im Kopfe zur Orientirung über die Richtung der Schallbewegung dienen. Klarer erwiesen ist die Fähigkeit des Ohrs, sich für schwache und starke Geräusche einzurichten. Sehr zarte Schallwellen bringt das Ohr durch das lose gespannte Trommelfell zum Bewufstsein, etwa wie ein locker gespannter Faden dem kleinsten Hauch folgt. Beim Lauschen wird ferner der kleinste Muskel des menschlichen Körpers, der Steigbügelmuskel, thätig. Er zieht die untere Ecke der Steigbügelplatte in die Membran des ovalen Fensterchens hinein, so dafs die Schwingungen empfindlicher werden. Hierbei geht das Steigbügelköpfchen und damit zugleich der lange Ambofsfortsatz nach innen, und, da die Drehung um den an der Paukenhöhlendecke befestigten kurzen Ambofsfortsatz erfolgt, wird dadurch die Ambofskrone gegen den Hammerkopf gedrückt, um selbst die schwächsten Schwingungen ohne Verlust auf das ovale Fensterchen zu vermitteln. Gegen sehr starke Schallwellen schützt sich das Ohr durch straffes Anziehen des Trommelfells. Der an der Spitze des Trommelfells angewachsene Hammerstiel rückt damit nach innen, der Hammerkopf nach aufsen, so dafs die auf ihm vorhandenen Kerbungen aus den entsprechenden Kerbungen des Ambofs etwas herausgehoben und die Schwingungen abgeschwächt auf Steigbügel und

ovales Fensterchen übertragen werden. Auf diese Weise werden wir fähig, das dröhnende Getöse des Strafsenlärms zu überhören, oder auf den ersten Bänken des Parkets das Fortissimo des Orchesters zu ertragen. Bei aufsergewöhnlichen Erschütterungen, z. B. einem in der Nähe abgefeuerten Kanonenschufs, hilft man sich bekanntlich durch weites Oeffnen des Mundes. Die Schallwelle dringt durch den Mund und die Eustachische Röhre in die Paukenhöhle und mildert durch die Gegenwirkung die aus dem Gehörgang auf das Trommelfell eindringende Schwingung. In gleicher Weise drückt sie vermittelnd auf das runde Fensterchen und so den Wellen des Gehörwassers entgegen.

## § 16.

### Unterschiede in der Kraft des Schalls. Reizschwelle.

Abgesehen von derartigen Explosionen ist auch schon der Intensitätsunterschied des starken Schalls, den das Ohr noch auszuhalten vermag, und des ganz schwachen Schalls, welcher eben noch im Stande ist, im Gehör eine Empfindung auszulösen, ein überaus grofser. Die Kraft des ersten Falls ist mehr als hunderttausendfach gröfser als die des zweiten Falls. Diese enormen Unterschiede werden durch die oben behandelten Schutzvorkehrungen im Hörmechanismus erträglich gemacht. Das Ohr hat damit die Fähigkeit gewonnen, sich wie das Auge für nahe und ferne, für starke und schwache Wirkungen einzurichten. Wir fühlen den Vorgang im Ohre fast nur beim Lauschen; gewöhnlich vollzieht er sich, ohne dafs wir uns Rechenschaft darüber geben, oder seiner auch nur bewufst werden. Das Ohr stellt gleichsam selbstthätig seine Hebelvorrichtung der erwarteten Schallwirkung entsprechend ein. Es war Eingangs von den aufserordentlich kleinen, unhörbaren (stummen) Schwingungen einer Saite die Rede. Werden derartige Schwingungen bei irgend einem schallfähigen Körper mehr und mehr verstärkt, bis ihre Wirkung dem Ohr endlich bemerkbar wird, so nennt man diese Empfindung die Reizschwelle. Dieser Beginn des Hörens einer bestimmten

Person auf eine bestimmte Entfernung bedingt auch ein bestimmtes Mafs (Amplitude) der Schallschwingungen, welches man die Schallschwelle nennen könnte. Mit der Reizschwelle ist für die Beurtheilung der Schallintensitäten eine Art fester Punkt gewonnen, der von gröfster Bedeutung ist und bis in die neueste Zeit der Schalllehre gemangelt hat. Dieser feste Punkt ist allerdings auch für dasselbe Individuum nur für einen nicht zu ausgedehnten Zeitraum, etwa eine bis zwei Stunden, vorhanden. Dies genügt jedoch zu Intensitätsvergleichungen. Nach Verlauf dieses Zeitraums sind die Bedingungen für die Reizschwelle mit etwas veränderter körperlicher Disposition des Beobachters sehr leicht ebenfalls etwas verändert, noch mehr an späteren Tagen. Bei verschiedenen Personen ist die Uebereinstimmung der Reizschwelle erst recht sehr selten. Trotz all dieser Einschränkungen ist der dadurch erreichte Fortschritt ein sehr wesentlicher.

## § 17.

### Die Theorie vom Quadrat der Entfernungen. Widersprechende Erfahrung beim Echo.

Nach einem bekannten Satze der Kräftelehre verhalten sich die mechanischen Arbeiten zweier Kräfte wie die Quadrate der Endgeschwindigkeiten der durch sie bewegten Körper, oder auf Schallschwingungen angewendet: wie die Quadrate ihrer Amplituden. Dasselbe etwa soll die landläufige Behauptung bedeuten: die Kraft des Schalls nimmt ab, wie die Quadrate der Entfernungen vom Ursprungsorte zunehmen. Die Schwingungen, welche in einfacher Entfernung die Fläche $f$ treffen, müssen sich in doppelter Entfernung über eine Fläche $= 4f$ vertheilen, können also in jedem Punkte der zweiten Fläche nur ein Viertel derjenigen Kraft äufsern, die sie bei der ersten besessen haben. Dies erscheint so einfach und unwiderleglich richtig und wird dennoch von unserem Gehör nicht anerkannt.

Bei Versuchen über die Zurückwerfung des Schalls wurden mir hierüber die ersten Zweifel rege. Stellen sich zwei Per-

sonen einem glatten Hausgiebel gegenüber auf, so dafs die Entfernung von demselben (Fig. 5) $ac = bc = 30$ m, die Entfernung der Person *a* von $b = 20$ m ist, und erzeugt *b* durch den Schlag eines Hämmerchens auf ein Brettchen einen Schall, so hört *a* zuerst den direkten Schall über *ba*, dann den reflektirten Schall *bca*. Abgesehen vom Reflexionsverluste müfste nach der Theorie der Reflex $\frac{20^2}{(30+30)^2} = \frac{400}{3600} = 1/9$ der Kraft des direkten Schalls haben. Dies traf bei den von mir mit einem Gehilfen wiederholt angestellten Versuchen durchaus nicht zu. Ich hörte in *a* den direkten und sofort hinterher den reflektirten Schall; letzterer betrug etwa ein Drittel des ersteren. Von ein Neuntel konnte gar keine Rede sein. Ebenso wenig traf die Theorie bei anderen Verhältnifszahlen zu. Nun wächst zwar, wie später erörtert werden wird, mit der Entfernung auch die Zahl der Reflexe und damit die Gesammtwirkung, doch konnte dies, da andererseits bei der Brechung an der Giebelwand ein Verlust eintritt, das höchst auffallende Ergebnifs nicht erklären.

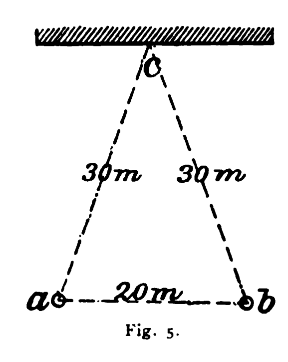


Fig. 5.

§ 18.

**Schallstärke. Schallmesser. Saitenhämmerchen. Fallstäbchen. Schwierigkeiten der Versuche.**

Bei dieser Sachlage war nur durch eine sorgsame Beobachtung der Schallintensitäten vorwärts zu kommen. Seit Jahren schwebte mir vor, wie etwa ein Schallmesser zu konstruiren sein würde. Um nicht etwas Ueberflüssiges, weil bereits Vorhandenes zu schaffen, sah ich zuvor noch die Akten und Register des Kaiserlichen Patentamts zu Berlin durch; ohne jeden Erfolg. Ein Schallmesser war nicht bekannt. Es blieb also nichts übrig, als selbst Hand anzulegen und zwar auf Grund folgender Erwägungen:

Die Stärken verschiedener Schallquellen lassen sich nicht gut vergleichen, weil die Verschiedenheit der Schallquelle auch

eine Verschiedenheit der Schallfarben, der Mischungen, aus denen die Schallwellen bestehen, mit sich bringt. Als Kraft, die den Schall hervorbringt, schien sich die Spannung einer aus ihrer Gleichgewichtslage gebrachten Saite zu empfehlen. Da die Saite zu jeder Schwingung, mag der Ausschlag gröfser oder kleiner sein, immer dasselbe Zeitmafs gebraucht, müssen die Geschwindigkeiten, mit denen sie die Ruhelage passirt, sich genau so verhalten wie die Ausschläge (Amplituden). Bei der doppelten, dreifachen u. s. w. Amplitude ist also auch die Geschwindigkeit doppelt, dreifach u. s. w. gröfser. Eine schwingende Saite ist jedoch für gröfsere Entfernungen keine hinreichend kräftige Schallquelle, auch läfst der Ausschlag sich genau nur in umständlicher Weise messen. Deshalb empfahl es sich, den Ausschlag auf einen Winkelhebel mit Hämmerchen wirken und so einen Schlag auf eine Holzplatte entstehen zu lassen.

Zwei Auflager *a* und *b* sind 60 cm von einander entfernt und über sie ist eine Saite mittels der Wirbel *c* und *d* gespannt (Fig. 6). Auf ihre Mitte *e* fafst mit dem Arm *he* der

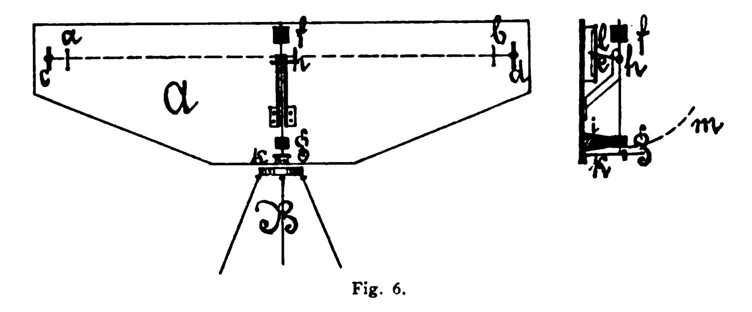


Fig. 6.

Hebel *fg* und spannt sie, sobald eine Drehung um die Achse *h* in der Richtung *gm* erfolgt. Der Saitenmittelpunkt *e* schiebt sich hierbei unter dem Millimetermafsstabe *l*, auf dem man die Ausschläge ablesen kann, entlang, ohne ausweichen zu können, da unter ihm ein parallel zu *l* mit Spielraum angebrachter Draht dies verhindert. Der Winkel *ehg* ist 94 Grad. Das auf den kleinen Ambofs *i* wirkende Hämmerchen *g* ist durch ein Gegengewicht *f* abgeglichen, um die Schwerkräfte auszu-

schliefsen. Die Ausschläge am Mafsstabe *l* abzulesen, erwies sich nicht als genau genug; es wurde daher das Hebelende jenseits *g* mit dreifacher Uebertragung auf einen zweiten, zur Hebelachse senkrecht stehenden Millimetermafsstab *k* nutzbar gemacht, dessen verstellbarer Schieber dem Ende zum jedesmaligen Auflager diente. Eine geringe Drehung des Mafsstabs um sein Scharnier liefs das Hämmerchen dann aus den verschiedenen Höhen auf den Ambofs hinabfallen. Die Auflagen *a* und *b* waren auf Schrauben beweglich, um die Lage der Saite genau am Hebel *he* herzustellen. Bei dieser Lage mufste *g* auf *i* ohne Druck ruhen. Da man nach kurzer Uebung die Mafse auf $^1/_{10}$ mm abschätzen lernt, da die Uebertragung dreifach ist, kann man die Ausschläge bis auf $^1/_{30}$ mm ablesen, was genügend genau erscheint. Die stets gleiche Spannung der Saite wird nach einer Stimmgabel (g der kleinen Oktave) durch die Wirbel hergestellt. Die Holzplatte *A*, auf der alle einzelnen Theile befestigt sind, wird in senkrechter Lage auf ein Statif *B* von 1,30 m Höhe aufgeschraubt; der Beobachter stellt sich in die Linie, die in *e* normal zur Plattenfläche *A* ist.

Bei doppelt so grofsem Ausschlage, also doppelter Geschwindigkeit, sollte nach der Theorie der Schlag des Hämmerchens viermal stärker schallen, da die Kraft mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst. Die Versuche ergaben indessen, dafs der Schlag nicht viermal, sondern nur zweimal stärker klang. Ganz gleich, mit welchen verschiedenen Geschwindigkeiten verfahren wurde, die Schallstärken wuchsen einfach mit den Verhältnifszahlen der Geschwindigkeiten, nicht mit den Quadraten dieser Zahlen.

Um klar zu sehen, ob vielleicht in der Zusammensetzung des Instruments ein Hindernifs der Theorie verborgen sei, wurde eine feine Stahlnadel mit kleinem Kopf mit dem ganzen Mafse ihrer Zuspitzung in ein Korkstück von gleichmäfsiger Textur gedrückt, senkrecht unter das Hämmerchen gebracht und mit einer gewissen Geschwindigkeit eingeschlagen. Alsdann geschah dasselbe mit vier genau gleichen Nadeln und

der doppelten Geschwindigkeit. In einer ganzen Reihe von Versuchen blieb die durchschnittliche Rammtiefe immer dieselbe für die eine wie für die vier Nadeln. Die lebendige Kraft des Schlages wuchs also thatsächlich wie das Quadrat der Geschwindigkeit. Und trotzdem war die Stärke des Schalls bei doppelter Geschwindigkeit auch nur doppelt so grofs, als bei einfacher Geschwindigkeit.

Es blieb noch zu untersuchen, wie verschiedene Massen oder Gewichte, die den Schlag und damit den Schall erzeugen, auf die Intensität des Schalls wirken würden. Hierzu wurden zwei Stäbchen aus Ahornholz ganz gleichmäfsiger Beschaffenheit gewählt, beide 10 mm hoch, das eine 8 mm, das andere aber 16 mm breit. Die Länge betrug gleichmäfsig 150 mm von der Achse an dem einen Ende, um die sie sich drehen konnten, bis zum anderen, mit dem sie von dem Schieber eines Millimetermafsstabs auf die abgerundeten Köpfe zweier gleichmäfsig angebrachter und gleicher Schrauben fallen und aufschlagen konnten. Das doppelt so schwere Stäbchen brachte mit der einfachen Fallhöhe dieselbe Reizschwelle hervor, wie das halb so breite Stäbchen mit der vierfachen Fallhöhe, oder, was dasselbe bedeutet, mit der doppelten Geschwindigkeit. Nach alledem schien es erwiesen, dafs die Kraft des Schalls mit der Amplitude der Schallschwingungen und nicht mit dem Quadrate derselben wuchs.

Abgesehen von dem Lärm der Grofsstadt wären auch die gröfsten Räume Berlins für die Versuche, bei denen mit einem Mindestmafs von 20 m zu beginnen war, nicht geeignet gewesen. Wären die Abmessungen aber auch genügend erschienen, so konnte wegen der Reflexe von allen Seiten das Resultat als ein entscheidendes niemals betrachtet werden. Es war nöthig, für den Ort der Untersuchung möglichst günstige Verhältnisse zu suchen: freies Feld weit ab von Berlin. So wurden denn grofse Waldblöfsen in den Rüdersdorfer Forsten und brachliegende Ackerstücke dazu ausgewählt. Die Schwierigkeiten, genaue Ergebnisse zu erzielen, waren unerwartet grofse. Die Versuche wurden im Mai und Juni 1892 unter-

nommen; trotzdem kamen windstille Tage fast gar nicht und selbst solche mit nur geringer Luftbewegung nur selten vor. Die günstigsten Stunden waren früh oder um Sonnenuntergang. Aber auch dann gab es unglaublich viele Störungen. Das Zirpen der Grillen, der Gesang der Vögel, der Ruf des Kuckucks, besonders jedoch das Krächzen der Krähen wollte nie ein Ende nehmen. Auch des Nachts hörten diese Hindernisse kaum auf. Absolute Stille ist in der Natur nur ausnahmsweise und nur für Augenblicke vorhanden, und solche Augenblicke mufsten für die zarten Schallwellen, welche die Reizschwelle erregten, mit eingestelltem Instrument geduldig abgewartet werden.

Nach alledem wird man es erklärlich finden, dafs das Ergebnifs der Versuche als völlig abgeschlossen nicht betrachtet wurde. Im Gegentheil sollten dieselben später wieder aufgenommen werden.

## § 19.

**Anderweite Schallmessungen. Vierordt. Schafhäutl. Oberbeck. Messung im geschlossenen Raume. Messung im Freien.**

Inzwischen erschien es mir immer weniger wahrscheinlich, dafs nicht bereits auch anderwärts ähnliche Erfahrungen gemacht worden sein sollten. Erfahrungen, zu denen nur etwas guter Wille und Zähigkeit und mäfsige Mittel hinreichten, die sich schon bei geringer Beobachtungsgabe gleichsam aufdrängten und die dabei doch geeignet waren, einen bisher allgemein giltigen Hauptlehrsatz der Schalllehre umzustürzen. Nach mancherlei vergeblichen Nachforschungen fand ich denn auch endlich auf der Königlichen Bibliothek in Berlin Professor Vierordt's Abhandlung: „Schall- und Ton-Stärke", Tübingen, 1885. Vierordt's Untersuchungen, bei denen er kleine Blei- oder Eisen-Kügelchen von verschiedenem Gewicht und aus verschiedenen Höhen auf dünne Platten von Schiefer, Metall oder Elfenbein fallen liefs, waren, unterstützt durch die Hilfsmittel der Universität (Tübingen), an geeigneten Orten angestellt worden und hatten ebenfalls ergeben, dafs die End-

schwindigkeit der Fallhöhe, also die Wurzel aus derselben,
: die Stärke des Schalls mafsgebend sei. Von den Vor-
ngern Vierordts hatte Fechner behauptet, dafs die Schall-
ırke abhängig sei von dem Quadrat der Endgeschwindigkeit
ıes fallenden Körpers (also von der Fallhöhe) multiplizirt
t dem Gewicht desselben. Bei der Endgeschwindigkeit $c$
$\sqrt{2gh}$ und dem Gewicht $p$ sei die Schallstärke $S = p \cdot c^2$
$p \cdot 2gh =$ der lebendigen Kraft des aufschlagenden Körpers.
hafhäutl dagegen nahm an: $S = pc =$ dem Bewegungs-
›ment $p \cdot \sqrt{2gh}$. Eingehende Versuche waren von Beiden
:ht gemacht worden. Vierordt fand nun, dafs das doppelte
›wicht mit der halben Fallhöhe, das dreifache mit einem
rittel Fallhöhe durchaus nicht dieselbe Schallstärke ergab
e das einfache Gewicht mit der ganzen Fallhöhe. Dagegen
ır die Schallstärke die gleiche, wenn statt der Fallhöhen die
'urzel derselben eingeführt wurden. Bei den weiteren, viel-
:h veränderten Untersuchungen durch Oberbeck stellte sich
raus, dafs die Schallstärke $S$ etwas mehr anwuchs als $\sqrt{h}$
er $h^{\frac{1}{2}}$. Statt des Exponenten $\frac{1}{2}$ mufste ein gröfserer Potenz-
ponent eingeführt werden, der nach den begleitenden Um-
ınden zwischen 0,57 bis 0,72 schwankte. Dieser Exponent
, wenn $P$ und $p$ die verschiedenen Gewichte, $h$ und $H$ die
gehörigen Fallhöhen bedeuten:

$$\varepsilon = \frac{\log \frac{P}{p}}{\log \frac{H}{h}}$$

Die Versuche Vierordt's in einem gröfseren Raum von
m Länge, 5,4 m Breite und 4,8 m Höhe ergaben für die
rschiedenen Entfernungen die folgenden Schallstärken $S$
.eizschwellen):

| | | |
|---|---|---|
| 22,9 cm | (1fache Entfernung) | $S =$ 54,76 |
| 45,8 cm | (2fache „ ) | $S =$ 98,22 |
| 91,7 cm | (4fache „ ) | $S =$ 148,00 |
| 137,5 cm | (6fache „ ) | $S =$ 168,90 |
| 502,0 cm | (22fache „ ) | $S =$ 243,00 |

Die Zahlen für die 6fache und für die 22fache Entfernung sind auch nach einer anderen Richtung hin sehr lehrreich. Bei 502,0 cm, der 22fachen Entfernung, genügte zur Hörbarkeit (Reizschwelle) die $\frac{243{,}0}{54{,}76} = 4{,}6$fache Schallstärke, während nach der bisher üblichen Theorie der Schallabnahme nach dem Quadrat der Entfernung die $22^2 = 484$fache Schallstärke, also eine hundertfach gröfsere nöthig gewesen wäre. Wenn aber auch festgestellt ist, dafs die Schallstärke abnimmt in dem Mafse, wie die Entfernungen zunehmen und hier statt der 22fachen doch nur die 4,6fache = etwa $^1/_5$ der 22fachen Schallstärke zur Erzielung der Hörbarkeit genügte, so geht hieraus doch der eminente Einflufs der schallverstärkenden Reflexe von Wänden und Decke mit überzeugender Deutlichkeit hervor. — Bei diesen Versuchen hatte das Fallkügelchen ein Gewicht von 36,5 mg, die Fallhöhe bei 22,9 cm Entfernung war 1,8 mm, der Potenzexponent $\varepsilon = 0{,}69$.

Für gröfsere Entfernungen benutzte Vierordt auf freiem Felde ein Schallpendel, welches aus einer feinen Metallstange mit Messinghämmerchen bestand, das auf eine kleine Platte von Eichenholz aufschlug und dessen Gewicht durch ein Gegengewicht abgemindert werden konnte. Der Drehpunkt ist zugleich der Mittelpunkt eines Quadrantenmafsstabes, an dem die Elevationswinkel des Pendels abgelesen werden können. Die Sinus der Winkel sind die Fallhöhen. Durch Zusammenwirken zweier ganz gleicher solcher Pendel wurde $E$ festgestellt auf 0,615. Die Versuche auf Entfernungen von 55 m, 110 m, 165 m und 220 m litten wie die meinigen etwas unter den Einflüssen äufserer Störungen, ergaben aber dennoch auch hier, dafs die Schallstärke zwei-, drei- und viermal so grofs gemacht werden mufste, um gerade noch hörbar zu werden.

### § 20.

**Die Stärkeabnahme der Töne erfolgt unter denselben Bedingungen, wie die der Geräusche.**

Alle bisher aufgeführten Fälle beziehen sich auf Geräusche. Es konnte fraglich erscheinen, ob für Töne das-

selbe gilt. Der Unterschied, den die Theorie konstruirt hat, dafs die Schallwellen bei Geräuschen unregelmäfsig, bei Tönen regelmäfsig seien, trifft in Wirklichkeit nie völlig zu. Selbst der reine Grundton einer gedackten Pfeife ist mit dem Zischen der Luft an der Mundöffnung, mit den Resonanzschwingungen des Pfeifenkörpers gemischt. Andererseits ist der Schall der vom Saitenhämmerchen getroffenen Holzplatte wahrscheinlich ganz ähnlich zusammengesetzt, wie derjenige Schall, den man durch gleichzeitiges Niederdrücken einer ganzen Oktave von Klaviertasten erzeugt. Hier schlägt jede Taste einen Ton an, dessen Zusammenklang mit den anderen Tönen aber, weil ihnen ein befriedigendes gemeinsames Grundmafs ihrer Schwingungszahlen fehlt, eine Dissonanz und so ein Geräusch bildet. Die Holzfasern der Platte sind elastisch; in Stäbchenform geben sie auf der Holzharmonika einen ausgesprochen musikalischen Ton. Es ist nicht anzunehmen, dafs sie überhaupt anders als regelmäfsig schwingen könnten. Das „Geräusch" der Platte rührt sehr wahrscheinlich von dem dissonirenden Zusammenwirken der Einzelfasern her. Auch die meisten Theile eines Gebäudes: Stein, Eisen, Holz sind elastisch, ihre Schallschwingungen einzeln regelmäfsig; nur die Kombination derselben läfst die Dielen „knarren", die Schlösser „rasseln", die Fenster „klirren". Eine unregelmäfsige Schallwelle kann man sich nur dort vielleicht entstehend denken, wo die elastische Faser durch Reibung angegriffen oder durch Bruch vernichtet wird; noch mehr, wo ein vollständiges Zermalmen stattfindet. — Ein Unterschied zwischen dem Verhalten des Schalls jener Holzplatte, ebenso der Vierordt'schen Plättchen einerseits und dem Verhalten der Töne andererseits kann nicht gut aufrecht erhalten werden. Um indessen für praktische Verwendnngen jeden Zweifel zu beseitigen, habe ich folgenden Versuch gemacht: auf eine kleine Glasplatte von 10 cm Länge, 3 cm Breite und 3 mm Dicke mit dem musikalischen Ton b'''' konnten zwei nebeneinander befindliche Fallstäbchen aus verschiedenen Höhen wirken. Durch die hölzernen 4 mm □ starken Stäbchen waren 10 cm vom Drehpunkt entfernt zwei genau

gleiche Messingschräubchen gezogen, während die 12 cm entfernten mit einem feinen Messingblech geschützten Stäbchenenden auf dem Schieber eines Millimetermafsstabes Auflager fanden. Die Glasplatte lag auf den Kanten zweier Korkprismen so auf, dafs der mittlere Theil 6 cm, die beiden Enden je 2 cm lang waren. Um das Klirren beim Aufschlagen der Schraubenköpfchen zu beseitigen, war die Aufschlagstelle der Platte mit einem Stückchen Seidenstoff beklebt. Es ergaben sich ganz dieselben Verhältnisse für die Stärkeabnahme des Tons der Glasplatte wie für die Stärkeabnahme des Schalls der früher behandelten Holz-, Metall-, Elfenbein- u. s. w. Platten.

## § 21.

### Die zweifache Amplitude der Schallwellen äufsert auch nur den zweifach stärkeren Reiz auf die Gehörnerven.

Wie ist es nun zu erklären, dafs — entgegen dem Prinzip der „lebendigen Kraft" — der Stofs einer bewegten Masse bei der doppelten, dreifachen Geschwindigkeit (Amplitude) nur einen Schall von der doppelten, dreifachen und nicht von der vierfachen, neunfachen Stärke hervorbringt? Man mufs unterscheiden zwischen der mechanischen Wirkung der Kraft: dem Schlage und den akustischen Folgen, den Schallschwingungen. Wir hören nicht den mechanischen Schlag, sondern nur diese Schwingungen, die bei ihrer aufserordentlich raschen Abnahme und kurzen Dauer auf unser Ohr den Eindruck auch eines Schlages machen und uns den mechanischen und den akustischen Vorgang für ein und dasselbe halten lassen. Die vierfache Kraft des Schlags löst sich in Schwingungen von doppelter Amplitude der schallenden Platte auf. Die Schwingungen setzen sich durch die Luft bis zum Trommelfell fort, wirken durch den Hebelmachanismus von Hammer, Ambofs und Steigbügel auf die elastische Membran des ovalen Fensterchens und gehen so in das Gehörwasser des inneren Ohres über, in dem die feinen Endigungen der Hörnerven schwimmen. Hier nun bringen nach den eingehenden, vielfach wiederholten, früher beschriebenen Versuchen die doppelten Amplituden auch

nur einen zweimal so starken Nervenreiz hervor. Könnten die Schwingungen doppelter Amplitude ihre Kraft in einem einzigen Schlage statt gegen jene Membran gegen einen unelastischen Körper äufsern und diese Wirkung durch die Nerven dem Gehirn übermittelt werden, so würde dort auch der Eindruck vierfacher Kraft ebenso stattfinden müssen, wie bei dem früher erwähnten doppelt so grofsen Saitenausschlage das Hämmerchen vier Nadeln in dieselbe Rammtiefe trieb, die bei dem einfachen Saitenausschlage eine Nadel ergab. Bei den harten Angriffen, denen unser Gehör vielfach ausgesetzt ist, können wir der Natur sehr dankbar sein, dafs der Nervenreiz sich nicht nach dem Prinzip der lebendigen Kraft quadrirt. — Ist denn das Prinzip in diesem besonderen Falle etwa suspendirt? Keineswegs; es ist nur gleichsam latent. Die zweifache Amplitude läfst beispielsweise eine Saite eine ganze Anzahl Schwingungen machen, ehe die einfache Amplitude und schliefslich die Ruhelage eintritt. Um jene Anzahl Schwingungen dauert die Bewegung länger. Aufser dem zweimal stärkeren Reize ist also auch die Zeitdauer der Leistung gröfser und hierdurch bleibt, wenn man zugleich Widerstände und Hindernisse der Bewegung berücksichtigt, das Prinzip der lebendigen Kraft auch hier gewahrt.

Herr Max Wien hat in neuerer Zeit einen sinnreichen Versuch gemacht, welcher zeigt, wie unter der Tonwirkung bei zunehmender Entfernung (auf freiem Felde bei Charlottenburg) die Amplituden schallempfindlicher Körper sich gestalten. An einer hohlen Glaskugel (Helmholtz'schen Resonator) ist gegenüber der Oeffnung für den Eintritt der Tonwellen eine zweite solche Oeffnung angebracht und auf dieser die obere Hälfte der Kapsel eines Aneroidbarometers aufgekittet. Das gewellte feine Blech der Kapsel tritt gleichsam an die Stelle des Trommelfells; mittels der Ausschläge eines auf seiner Mitte sitzenden Stifts kennzeichnet es die Stärke der Tonwellen im Resonator. Auf der Stiftspitze liegt, von seitwärts gehalten, eine dünne, etwas gekrümmte Stahlfeder leise auf, so dafs die Schwingungen auf sie, besonders aber auf einen kleinen, an

ihrem freien Ende schwebenden Spiegel sich übertragen müssen. Das Spiegelbild eines schmalen, hellerleuchteten Spalts wird nun in bekannter Weise durch ein Fernrohr beobachtet, dessen Okular durch eine bis 0,2 mm getheilte Glasplatte im Brennpunkte ein Ablesen ermöglicht derjenigen Ausschläge, welche der Spiegel in Folge der Tonwellen macht. Auf den Grundton des Resonators ist das schwingende Kapselblech abgestimmt, und denselben Ton hatte auch die Pfeife, die als Tonquelle bei der Untersuchung diente. Der Blasebalg dazu arbeitete mit regulirter, stets gleicher Kraft. Mit der Zunahme oder Abnahme der Tonstärke wurde aus dem Spiegelbilde des feinen Lichtspalts ein breiteres oder schmaleres Band. Die Breite dieses Bandes (d. i. die Ausschläge des Lichtspalts) nahm bei den Untersuchungen hinreichend genau in demselben Verhältnifs ab, wie die Entfernungen des Resonators von der Pfeife wuchsen. In diesem dem Gehöre ähnlichen Mechanismus fand sich also bestätigt, was weiter oben als Wirkung der Schallwellen auf das Gehörwasser angenommen worden war.

### § 22.
#### Nutzen des Fallstäbchens bei Beurtheilung der Schallentwicklung in gröfseren Räumen.

Der Vorzug des Seitenhämmerchens, dafs dessen Saitenamplituden zugleich die Geschwindigkeiten darstellen sowie seine Aehnlichkeit mit dem Hebelmechanismus der Schallübertragung im Ohre, haben mich veranlafst, die Konstruktion in dieser kleinen Schrift mit aufzuführen. Für praktische Untersuchungen werden sich Fallstäbchen, wie sie oben bereits beschrieben sind, besser eignen. Da bis zu 9 Grad die Sinus, Tangenten und Bogenlängen in ihren Werthen hinreichend genau zusammenfallen, werden die Abmessungen der Stäbchen so gewählt werden müssen, dafs die Stärke ihres Fallschlags für alle Fälle genügt und dabei ein Fallwinkel von 9 Grad über oder unter der Horizontalen nicht überschritten wird. Ein solches überaus einfaches, kleines und leichtes Instrument wird in den meisten Fällen genügen. Es gehören dann dazu nur noch eine Libelle und ein Stativ.

In Fig. 7 und 8 ist ein Schallmesser dargestellt. Auf der Holzplatte *a* sind zwei Lagerpaare *b* befestigt, zwischen denen sich zwei Holzstäbchen von 4 mm □ um die Axen *c* drehen können. 10 cm von *c* entfernt sind durch die Stäbchen zwei feine Messingschrauben *d* gezogen. Die 12 cm von *c* endigenden Stäbchen sind bei *e* mit untergelegten Messingplättchen versehen. Auf dem um ein Scharnier drehbaren Millimeter-

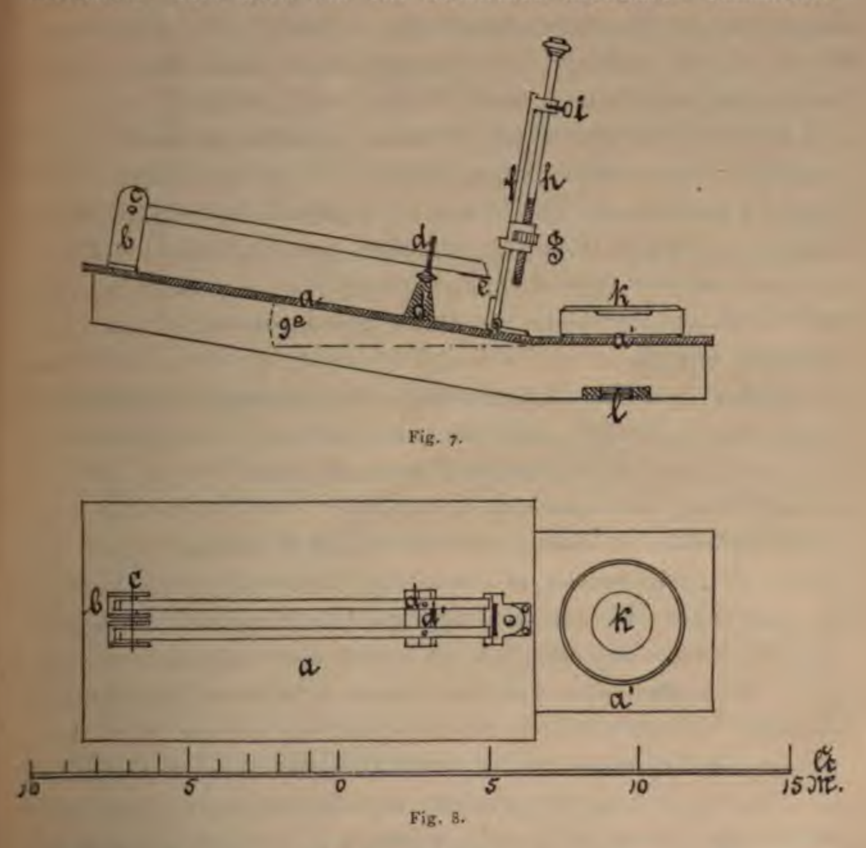


Fig. 7.

Fig. 8.

mafsstabe *f* bewegt sich der Schieber *g*, von dessen Vorsprung die Stäbchenenden *e* aus beliebigen Höhen herabfallen können, so dafs die Schräubchen *d* dabei auf den kleinen Ambofs *d'* aufschlagen und die Platte *a* zum Schallen bringen. Der Schieber zeigt auf 0 des Mafsstabs, wenn die Schräubchen auf seinem Vorsprung und zugleich auf dem Ambofs aufliegen. Differenzen

sind durch Drehen der Schräubchen leicht zu beseitigen. Durch den Schieber *g* läuft die Spindel *h*, die an ihrem unteren Theile ein Gewinde für die im Schieber befindliche Mutter hat, mittels der nach ungefährer Richtigstellung, sobald die Klemmschraube *i* die Spindel *h* festhält, die feinere Einstellung auf Zehntelmillimeter erfolgen kann. Die Befestigung auf einem leichten Stativ, wie es die Amateurphotographen gebrauchen, findet durch die Schraubenmutter *l* statt. Die horizontale Platte *a'*, auf welcher die Dosenlibelle *k* ihren Platz findet, macht mit der Platte *a* einen Winkel von 9 Grad.

Es sind zwei Stäbchen *cd* neben einander angeordnet, die zusammen oder einzeln fallen können. Es ist dies nöthig, um $\varepsilon$ (§ 19) zu bestimmen. Die Versuche ergaben, dafs ein Stäbchen aus der 3,3 fachen Höhe fallen mufste, um die Reizschwelle zu erregen, die bei derselben Entfernung die zwei Stäbchen mit ihrem Fall aus der einfachen Höhe hervorgerufen hatten. $\varepsilon$ ist hiernach $= 0,58$.

Bisher war bei Beurtheilung der Schallentwickelung in einem grofsen Raume, z. B. einem Konzertsaale, der Baumeister sehr unbestimmten Eindrücken preisgegeben, wie er sie von verschiedenen Standpunkten aus bezüglich der Musik oder auch des gesprochenen Wortes empfing. Dabei wechselte Art und Stärke der Schallquelle in einem fort; denn für jeden Vortrag ist ein solcher Wechsel Bedingung. Das Ergebnifs der Untersuchung konnte hiernach nur ein ungewisses und schwankendes sein. Stellt man dagegen den vorbeschriebenen Schallmesser auf dem Orchesterpodium auf und ermittelt dann die Fallhöhe, welche für die Reizschwelle eines Zuhörers auf der Längsaxe in 20 m Entfernung vom Podium erforderlich ist, so kann man mit diesem Grundmafs sehr leicht und bequem die anderen Fallhöhen vergleichen, welche zur Erregung der Reizschwelle nöthig werden an allen anderen Punkten des Saales, an den Längswänden, an der Schlufswand, auf den Galerien, wenn deren vorhanden sind. Statt einer zweifelhaften Empfindung, wie früher, wird man einen sicheren Ueberblick über die Schallvertheilung erhalten. Vor allem wird — bei zweckmäfsiger

Anordnung — der grofse und günstige Einflufs der von den Wänden, dem Fufsboden und der Decke zurückgeworfenen Schallwellen, der Reflexe, klar werden.

§ 23.

Reflexe.

Zu der Schallwelle, welche durch die Luft in gerader Linie zu uns gelangt, gesellen sich je nach der Umgebung in gröfserer oder geringerer Zahl, im Freien vom Erdboden, Bäumen, Sträuchern u. s. w., im geschlossenen Raume von den diesen begrenzenden Flächen zurückgeworfene und so an unser Ohr gelangende Schallwellen. Jene Welle ist der direkte Schall, welcher durch die zurückgeworfenen Wellen, die Reflexe, stets verstärkt wird. Reflexe sind überall vorhanden. Die Wolken reflektiren den Donner mit betäubender Kraft; die dichtere Luftschicht wirft die Schallwellen zurück, die aus einer weniger dichten Luftschicht zu ihr gelangen. Auf einer scharfen Bergspitze, in der Gondel des Luftschiffers giebt es immer noch Reflexe, aber der Klang der Stimme verfliegt matt, weil die Zahl der reflektirenden Körper gering und die Luft dünn ist. Die dichtere Luft ist zugleich schwerer, ihre Schallwellen haben daher eine gröfsere Wirkung, als in dünner leichterer Luft. Auch im Walde ist während der schönen Jahreszeit die Luft stets kühler und schwerer, als auf sonnigem freien Felde. Während man hier ein laut gesprochenes Wort auf 30—40 m Entfernung versteht, bleibt dasselbe im Walde auf 60—80 m verständlich. Auf freien Felde reflektirt nur der Erdboden, im Walde ist der ganze Raum mit unendlich vielen Reflexionsflächen an allen Stämmen, Aesten, Zweigen und Blättern erfüllt. An einem stillen Abende habe ich den Schall des Seitenhämmerchens bei 0,40 mm Ausschlag im Walde bis auf 320 m hören können. Der Schall hörte sich nicht stärker an auf 20 m, wie etwa ein Bittsteller schüchtern an die Thür eines einflufsreichen Mannes klopft; und doch war er so weit vernehmlich!

§ 24.

Einfallwinkel. Reflexionswinkel. Parabel. Kreis. Ellipse. Langhans.

Schallwellen, welche eine Fläche treffen, werden ähnlich wie Lichtwellen zurückgeworfen. Errichtet man im Treffpunkte ein Loth auf der Fläche, so heifst der Winkel, den die Wellenrichtung mit dem Lothe bildet, der Einfallwinkel, und der Winkel, den die Richtung der zurückgeworfenen Wellen mit dem Lothe macht, der Reflexionswinkel. Einfallwinkel und Reflexionswinkel sind einander gleich. Wie das Spiegelbild eine Umkehr aller einzelnen Theile zeigt, so haben auch die reflektirten Schallwellen eine Umkehr ihrer Phasen. Man pflegt zu sagen: bei der Reflexion verliert die Schallwelle eine Phase.

Dafs die Zurückwerfung der Schallstrahlen nach diesem Gesetz erfolgt, ist folgendermafsen erwiesen: eine parabolische Hohlfläche, in deren Brennpunkte ein tönender Körper sich befindet, wirft bekanntlich die vom Brennpunkte ausgehenden Strahlen parallel zur Parabelaxe zurück. Wird auf dieser Axe in weiter Entfernung eine zweite gleiche Hohlfläche der ersten gegenüber aufgestellt, so sammelt sie jene parallelen Strahlen, hier also die Schallwellen, in ihrem Brennpunkte. Das Ticken einer Uhr in dem einen Brennpunkte hört man sehr deutlich im andern Brennpunkte, während es aufserhalb des letzteren nicht vernommen wird. Ganz ähnlich verhält es sich mit zwei gegenüber gestellten Hohlkugelflächen, auf deren gemeinsamer Axe die charakteristischen Stellen etwa um die Hälfte des Radius von den Kugelflächen abliegen. Hier findet allerdings keine mathematisch genaue Sammlung in einem Punkte, sondern nur eine Häufung der Schallwellen um diesen Punkt herum statt. Genau aber wird die Konzentrirung wieder in dem einen Brennpunkte eines elliptischen Hohlkörpers für alle Schallwellen, die aus dem andern Brennpunkte kommen und von der Hohlfläche zurückgeworfen werden. Zur Klarlegung der Schallwirkungen in gröfseren Räumen wird hiervon später Gebrauch gemacht werden.

Ihrer Einfachheit und Handlichkeit wegen herrscht im Bauwesen die Kreislinie, die Zylinder- und die Kugelfläche vor.

Die Folge davon sind Häufungen der zurückgeworfenen Schallwellen an einzelnen Orten, wo sie lästig werden, wenn dort Zuhörer sich befinden. Schon 1810 hat dies Langhans in seiner Katakustik nachgewiesen. Auch die akustischen Wunder alter und neuerer Zeit, die Flüstergrotten und Flüstergalerien sind aus obigen Gesetzen zu erklären. In der katholischen Kirche in Hirschberg i. Schl. hört man auf der Empore unter der Vierung der Kuppel über die ganze Diagonale hinweg das gegenüber ganz leise geflüsterte Wort. Nicht ganz so stark, aber immer noch erkennbar ist die Häufung der Reflexe in den Ecken aller Räume. Man hört dort besser als an andern Stellen; am besten was in der diametral oder diagonal gegenüberliegenden Ecke geäufsert wird.

§ 25.

Reflexionsverluste.

Alle Lichtspiegel sind zugleich Schallspiegel. Ueber eine ruhige Wasserfläche hinweg versteht man erstaunlich weit das jenseits gesprochene Wort. Die glatte Fläche überträgt nicht nur die auf ihr selbst stattfindende Schallbrechung, sondern auch alle Reflexe, die am jenseitigen Ufer entstehen, mit einem Minimum von Kraftverlust. Dasselbe thun polirte Stein- und Stuckflächen. Den äufsersten Gegensatz hierzu bilden faltige schwere Plüschdraperien. Aber auch bei diesen werfen die vielen glatten Seidenfädchen immer noch einen Theil des Schalls zurück. Dies beweist der merkliche Unterschied der Klangstärke, wenn ein Redner oder Sänger bei seinem Vortrage eine solche Draperie hinter sich hat und wenn er ganz frei steht. Zwischen die sehr geringe Reflexionswirkung einer solchen Oberfläche und die nahezu vollkommene einer spiegelnd polirten Wandfläche wird man die Wirkungen der andern bei Bauten vorkommenden Flächen einzureihen haben. Am wichtigsten hiervon erscheint das Verhältnifs einer glattgeputzten, einer nur gefugten Wand und einer solchen mit glattgestrichenem Rappputz. Die Reflexionswirkung dieser drei Flächen fand ich Gelegenheit festzustellen. Die Art des

Messens war so einfach als möglich; darf also auf Zuverlässigkeit einigen Anspruch erheben.

§ 26.

Messen des Reflexionseffekts. Reihe der Reflexionswirkungen.

Ein glattgeputzter Giebel, von dem das Instrument 47,5 m entfernt war, gab einen gerade noch schwach hörbaren Widerhall (Reizschwelle) bei einem Ausschlage der Saite von 0,33 mm. Dieser Ausschlag wurde als Mittel von zehn Versuchen festgestellt und nun in ebenso viel Versuchen ermittelt, wie weit der Schall bei diesem Ausschlage auf freiem Felde noch hörbar blieb: auf 115 m. Durch die Reflexion des Giebels wurde der Schall, der dabei einen Weg von $2 \cdot 47{,}5 = 95$ m durchlief, zurückgeführt auf $\frac{95}{115} = 83\%$ des direkten Schalls. Bei einem anderen Versuch an einem stillen kühlen Abend ergaben sich sogar 87%. Ein gefugter Giebel zeigte 75%, ein solcher mit oberflächlich durch die Kelle glattgestrichenem Rappputz 50% Reflexionseffekt. Um schliefslich einen Grenzwerth nach der anderen Richtung zu finden, wurde das Echo eines Waldrandes hervorgerufen, welches mit 17% der direkten Schallkraft antwortete.

Mit diesen Ergebnissen habe ich mich begnügen müssen, und sie der folgenden Abstufung zu Grunde gelegt:

| | | |
|---|---|---|
| Wasserspiegel reflektirt mit | 95% | Nutzeffekt |
| Polirte Stein- oder Kalkwand | 95% | „ |
| Polirte oder lakirte Holztäfelung | 95% | „ |
| Gestrichene Holztäfelung | 90% | „ |
| Glattgeputzte Wand | 80—85% | „ |
| Gefugte Wand | 75% | „ |
| Reliefirte Wandfläche mit plattgeputztem Grunde | 64% | „ |
| Glattgestrichener Rappputz | 50% | „ |
| Eben getretene Kiesfläche | 50% | „ |
| Mit kurzem Besen gerauhter Putz, sogenannter Stippputz | 35% | „ |
| Ausgesteifte Theaterdekorationen | 30% | „ |
| Faltige Plüschdraperie | 20% | „ |

Die Holztäfelungen sind in obiger Reihe deshalb so hoch bewerthet, weil bei ihnen eine starke Resonanz mitwirkt. Der glatte Wandputz spielt in den folgenden Untersuchungen eine hervorragende Rolle. Er ist dort immer nur mit 80% Nutzwirkung aufgeführt. Bei den vielen daraus hergeleiten Folgerungen schien es vorsichtiger und zuverlässiger, den kleineren Wert zu Grunde zu legen.

### § 27.
### Glatter Wandputz als Lichtspiegel und als Schallspiegel.

Für manche Erwägungen der Schallreflexion kann man sich bei der Lichtspiegelung, die viel deutlicher zu verfolgen ist, Aufklärung verschaffen. Das Spiegelbild der Sonne erscheint auf einer glatten Wasserfläche scharf begrenzt und blendend. Reflektirt aber eine glattgeputzte helle Hausfaçade das Sonnenlicht, so treten ganz veränderte Verhältnisse auf. Der Ort, welcher nach der mathematischen Konstruktion das Sonnenbild dem Beschauer zeigen müfste, ist nur wenig heller, als die übrige Fläche, die in ihrer ganzen Ausdehnung das Licht mit einer Intensität zurückwirft, die nur sehr allmählich von jenem Orte nach allen Seiten hin abnimmt. Der Vorgang erklärt sich so: bei einer Putzfläche wird durch das Reibebrett immer nur ein Theil zu einer Art Ebene gestaltet, der andere Theil bleibt tiefer wie ein fein verzweigtes Thalsystem liegen. Die flachen Thalränder haben Licht oder Schatten; sie vertheilen auf diese Weise die Reflexion über die ganze Fläche. Nur bei dem Streiflicht der untergehenden Sonne wird die Sache anders. Die Strahlen treffen vorzugsweise das Hochplateau, das für den Beschauer sich in der Verkürzung zu einer geschlossenen Ebene vereint und fast einer Spiegelfläche ähnlich wird. Abends kann man bei klarem Wetter solche spiegelnden Façaden überall beobachten. Durch Anstrich, Abschleifen, Lackiren u. s. w. wird die Fläche zu einem wirklichen Spiegel, wie dies bei Marmor und Granit durch Schleifen und Poliren mit Metalloxyden ebenfalls stattfindet.

Aus denselben Gründen giebt es eine Schallreflexion, wie

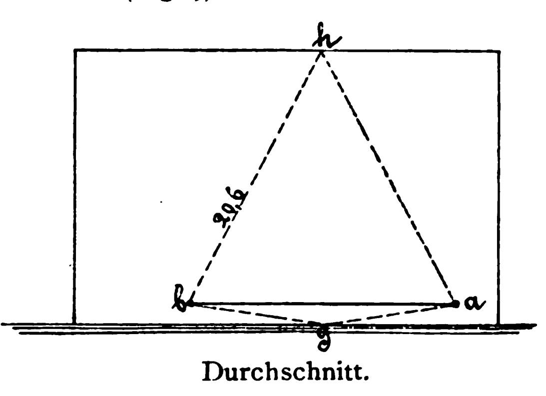
man sie bisher anzunehmen gewohnt war, für geputzte Mauerflächen ebenso wenig, wie für Fufsböden u. s. w., wenn man sie nicht schleift und polirt. Die Reflexion findet zwar zuerst von dem mathematischen Spiegelpunkte, aufserdem aber von der ganzen anderen Fläche statt. Den Beweis, dafs Schall und Licht hierbei gleichen Gesetzen folgen, kann man sich leicht verschaffen. Stellt man sich in angemessener Entfernung von einer glatten Mauerfläche senkrecht zu einer gröfseren Oeffnung derselben auf (ich benutzte den leeren Raum zwischen zwei Nachbargiebeln) und führt einen kurzen, scharfen Schlag aus, so hört man, obwohl die mathematische Reflexionsfläche gänzlich fehlt, dennoch klar und deutlich das Echo als Beweis, dafs die übrige Mauerfläche antwortet. Ist eine Oeffnung oder Lücke nicht vorhanden, so kommt scharf einsetzend und am lautesten der Widerhall von dem nächsten Punkte, den das Loth treffen würde, vom Reflexionspunkte; dann sich hieran anschliefsend nach einander von allen anderen Punkten, hierbei mit der wachsenden Entfernung auch in der Schallstärke etwas abnehmend. Der Eindruck ist trotzdem ein geschlossener, da das Ohr aufser Stande ist, diese bei unendlich kleinen Wegedifferenzen ineinanderfliefsenden Wirkungen zu sondern. Nicht so deutlich erkennbar, nicht so gut nachzuweisen wie das Echo, aber genau nach denselben Gesetzen erfolgt die Reflexion des Schalls von den Flächen aller Innenräume. Da die ganze Kopffläche des Hörers schallempfindlich ist, wird man sich die direkten Schallwellen denken können als einen Kegel, dessen Spitze die Schallquelle, dessen Basis die Kopffläche ist; den Reflex einer spiegelglatt polirten Stuckwand als einen gebrochenen Kegel, dessen elliptische Bruchfläche auf jener Wand sich ebenso bildet, wie die Erscheinung der Mondscheibe auf einem stillen Weiher. Der Reflex würde von dort beim Zuhörer wie ein Schlag anlangen. Derartige gefährliche Wirkungen hat Verfasser in einem öffentlichen Saale durch übergehängte Draperien wegschaffen müssen. Bei einer geputzten Wand werden die Reflexe zwar über einen gröfseren Theil derselben vertheilt, von jener Fläche

er immer noch sehr scharf und für das Ohr gewöhnlich
l eingeleitet. — Streifen Schallwellen eine Putzwand,
en sie ähnliche Wirkung, wie die vorerwähnten Strahlen
tergehenden Sonne; sie werden durch die Reflexion nur
zerstreut. Längs einer solchen Wand hört man ein
Wort auf eine gröfsere Entfernung.

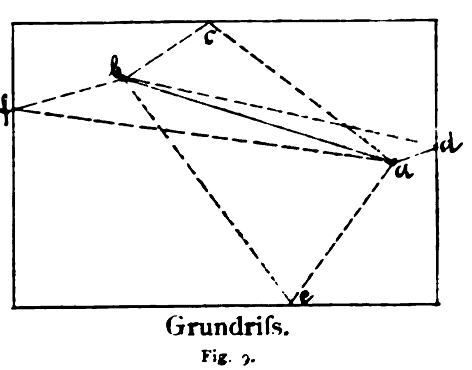
§ 28.

Störende Reflexe der glatten Putzwände eines Saals.

enn in dem Grundrifs eines Saales von 30 m Länge,
reite und 19,5 m Höhe (Fig. 9) *a* einen Redner, *b* einen
r bedeutet, so
r direkte Ton
nachdem er
tfernung *a b*
durchlaufen
*b* zuerst ein.
n reiht sich
ler Reflex des
dens aus *g* (im
chnitte) mit
ganz gerin-
Wegunter-
, dann von
ngseite aus *c*,
ckseite aus *d*,
veiten Lang-
s *e*, der zwei-
hmalseite aus
lich von der
, aus *h* (mit
n Wegdiffe-
eginnend, an. Am wenigsten stören wird der Reflex des
dens, da das Ohr eine so geringe Zeitdifferenz nicht
den kann. Auch das spätere Eintreffen des
geworfenen Schalls wird noch keinen übl



Durchschnitt.



Grundrifs.

Fig. 9.

machen. Je mehr aber das bestimmte Einsetzen der Reflexe von den glatt geputzten Wänden aus den Punkten *def* sich verzögert und von dem Einsetzen des direkten Schalls trennt, um so empfindlicher wird die Deutlichkeit der Rede gestört werden. Am meisten wird dies stattfinden durch den Deckenreflex mit 21,2 m kleinster Wegedifferenz. Zu diesen Unzuträglichkeiten tritt ferner noch der Nachhall, welcher an Wänden, Decke und Fufsboden durch mehrfache Reflexion der Schallwellen mit immer längeren Wegen entsteht und erst allmählich erstirbt. Ein derartiger Raum mit einfach glatten Putzwänden würde für Vorträge völlig unbrauchbar sein; der Redner könnte, wie man zu sagen pflegt, sein eigenes Wort nicht verstehen. Nur in besonderen Fällen, von denen noch die Rede sein wird, werden gewöhnliche Putzflächen zu verwenden sein. Auszuschliefsen sind sie fast immer bei der dem Vortragenden gegenüberliegenden Schlufswand, da von derselben störender Nachhall, bei hinreichender Entfernung sogar Widerhall zu befürchten ist.

## § 29.
### Die Bedeutung der Reflexe bei wachsender Entfernung von der Schallquelle.

Im Verhältnifs zum direkten Schall werden die Reflexe um so kräftiger sein: 1. je näher einer reflektirenden Fläche der Zuhörer sich befindet; 2. je weiter er von der Schallquelle entfernt ist. Die erste Bedingung ist aus der geringeren Wegedifferenz ohne weiteres verständlich. Die zweite mag durch ein Beispiel klar werden.

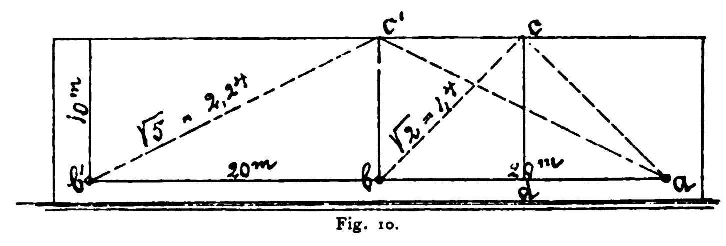



Fig. 10.

Ist *a* (Fig. 10) die Schallquelle, *b* ein Zuhörer in 20 m Entfernung, *b'* ein solcher in 40 m Entfernung, die Fläche *cc'*

von der Linie $ab'$ 10 m abliegend, so verhält sich (abgesehen von Reflexionsverlust) die Intensität des Reflexes $cb$ zu der des direkten Schalls $ab$ wie $ab : acb = 1 : 1,4$, d. h. der Reflex hat $\frac{1}{1,4} = 0,71$ der Intensität des direkten Schalls. Die Intensität des Reflexes $c'b'$ verhält sich zu der des direkten Schalls in $b'$ wie $ab' : ac'b' = 4 : 4,5 = 8 : 9$, d. h. der Reflex $cb'$ gewinnt hier schon $^8/_9 = 0,9$ der Intensität des direkten Schalls.

Allgemein darf man sagen: mit dem wachsenden Abstande von der Schallquelle erhalten die Reflexe im Vergleich zum direkten Schall eine immer gröfsere Bedeutung.

Man pflegt im gewöhnlichen Leben mit Nachhall die Gesammtheit der Reflexe, welche den direkten Schall begleiten, zu bezeichnen. Bei nicht sachgemäfser Anordnung wird dieser Nachhall um so lästiger und störender, je mehr er hinter dem direkten Schall herschleppt. Deshalb haben manche Baumeister geglaubt, nach der möglichsten Beseitigung desselben streben zu müssen. Mit Recht sagt jedoch Langhans: diese Bemühungen, die Schallreflexe fortzuschaffen, wären gerade so sinnreich, als wenn man die Beleuchtung eines grofsen Saales dadurch zu bessern dächte, dafs man Wände und Decke mit einem schwarzen Anstrich versähe, welcher das Licht verschluckt.

## § 30.

### Nachhall.

Glücklicherweise giebt es keinen Stoff, keine noch so weiche Draperie, die nicht immer noch einen Theil der Schallwellen zurückwirft. Für die Tonwirkungen wäre eine solche Anordnung ebenso ungeschickt wie für die Lichtwirkungen, da die Reflexe sehr wohl geeignet sind, den direkten Schall dort wesentlich zu unterstützen und zu kräftigen, wo er es am meisten braucht: auf gröfsere Entfernungen. Soll die menschliche Stimme in einem Raum von 50—60 m Länge bis zu den letzten Plätzen hinreichend verständlich sein, so ist hierbei die günstige Mitwirkung der Reflexe nicht zu entbehren.

## § 31.

### Silbendauer. Pausen. Zulässige Wegedifferenz.

Die zurückgeworfene Schallwelle mufs ihres längeren Weges wegen immer etwas später eintreffen, als die direkte Schallwelle; ein entsprechender Theil der Zeitdauer des Reflexes fällt hinterher. Je kleiner dieser Theil ist, um so besser für die Deutlichkeit. Man mnfs sich indessen klar machen, dafs die Reflexe mit kleinster Wegedifferenz, welche sich unmittelbar an den direkten Schall anschliefsen, auch zugleich die kräftigsten sind, und dafs die folgenden Reflexe der wachsenden Wegelänge wegen mehr und mehr in ihrer Intensität abnehmen, schliefslich kaum noch hörbar und deshalb ohne Einflufs sind. Man pflegt anzunehmen, dafs ein Redner in einer Sekunde nicht mehr als fünf Silben zu sprechen pflegt. Auf eine Silbe käme hiernach eine Fünftel Sekunde. Wenn die Reflexe höchstens um ein Viertel dieser Silbendauer sich verzögerten, zu drei Viertel aber mit dem direkten Schall zusammenfielen, so würde man dies als ein günstiges Ergebnifs ansehen können. Denn nur ein Viertel der Zeitdauer der Reflexe schleppt dann dem direkten Schall nach, und zwar, wie oben erwähnt, mit rasch bis zur Unhörbarkeit abnehmender Intensität. Dafs das Ersterben der Reflexe nach dieser Zeitdauer stattfinde, ist für die Deutlichkeit mafsgebend. Zwischen zwei Silben findet fast immer ein Wechsel in Kraft und Höhe des Tons statt. Dieser Wechsel sowohl als die Bildung der Konsonanten, welche die Vokale der Silben sondern, erfordern einen geringen Zeitaufwand zur Auspannung oder zum Nachlassen der Muskeln des Brustkorbs, ebenso der Stimmbänder, eine Aenderung der Mundstellung u. s. w. In die hierbei entstehende kleine Pause fällt unschädlich obiges Viertel der Zeitdauer der hinter dem direkten Ton nachfolgenden erlöschenden Reflexe. Gröfser als zwischen zwei Silben ist die Pause zwischen zwei Worten; sie wächst, wo in der Schrift ein Komma, noch mehr, wo ein Punkt oder gleichwerthiges Zeichen steht. Die Pausen gewähren den Zuhörern die Möglichkeit, dem Redner zu folgen. Dieser hat die Länge der-

selben der Natur des behandelten Gegenstandes, der Gröſse des Raumes und der Zahl der Anwesenden entsprechend zu gestalten, wenn er Erfolg haben will. Im Theater werden die Pausen durch das stumme Spiel der Schauspieler als Ausdruck der Seelenstimmung häufig viel wichtiger als die Worte.

Aus der Zeitdauer, um welche die entferntesten Reflexe dem direkten Ton nachschleppen dürfen, aus $1/4 \cdot 1/5 = 1/20$ Sekunde folgt zugleich das Maſs der äuſsersten Wegedifferenz der Reflexe gegen den direkten Schall $= \frac{342,5}{20} = 17$ m. Dieses Maſs entspricht sowohl den Entwickelungen, die Langhans in seiner Katakustik 1810 gegeben hat, wie auch den Annahmen französischer Architekten (Daly, Davioud, Bourdais); man pflegt es die zulässige Wegedifferenz zu nennen. Ueber diese muſs sich der Baumeister bezüglich aller Plätze in einem groſsen Versammlungsraume genaue Rechenschaft geben, auſserdem aber sich klar sein, wo er glattgeputzte Flächen passiren lassen kann und wo er deren üble Wirkungen durch anderweite Ausbildung zu beseitigen haben wird.

### § 32.
#### Betonung. Übergang zur nicht betonten Silbe.

Geschieht diese Beseitigung in genügender Weise, wird die Kraft der nachfolgenden Reflexe gehörig zertheilt, so verliert die zulässige Wegedifferenz auch viel von ihrer Bedeutung. Von jenen fünf Silben in einer Sekunde werden durchschnittlich höchstens zwei stärker betont. Bei den Anfangsstrophen des Monologs im Faust sind beispielsweise:

Habe nun, ách! Philosophíe,
Juristeréi und Medicín,
Und léider auch Theologíe!
Durcháus studirt, mit héiſsem Bemǘhn.

33 Silben vorhanden, von denen neun einen wesentlich stärkeren Accent erhalten, als die anderen dazwischen liegenden 24. Die gröſsere Kraft, mit welcher die betonte Silbe gesprochen wird, bedingt aber auch zugleich eine längere Zeitdauer für

dieselbe, die für die Entwicklung dieser stärkeren Tongabe durch die Stimme nothwendig wird. (Der Zusammenhang zwischen Dauer und Stärke läfst sich am einfachsten bei dem Ton einer Saite veranschaulichen. Bewirkt eine Kraft $p$ eine Amplitude $\alpha$ und wird $p$ bei jeder Doppelschwingung wiederholt, so wächst — abgesehen von Luft- und Reibungswiderständen — $\alpha$ auf $\alpha\sqrt{2}$, $\alpha\sqrt{3}$ u. s. w. und damit auch die Tonstärke auf das $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ u. s. w. fache. Soll die Zunahme rascher erfolgen, dann mufs aufserdem auch $p$ mehr und mehr vergröfsert werden. Die Dauer von $p$ bleibt aber immer der wesentlichste weil bequemste Faktor beim Erzeugen der Tonstärke. Zu derselben Stärke gehört bei längerer Dauer eine geringere, bei kürzerer Dauer eine um so gröfsere Kraft. Der Klang der menschlichen Stimme wird durch die in der Brust aufgespeicherte, komprimirte Luft hervorgebracht. Dieser Vorrath ist beschränkt, darf anch nur von Zeit zu Zeit erneuert werden; Redner wie Sänger müssen sorgsam damit wirthschaften. So finden sie sich zur Verstärkung des Tons in erster Linie auf die Dauer angewiesen. Nur bei Ausbrüchen der Leidenschaft wird der Kraft die Hauptrolle zufallen. Die Wirkung, die der eines scharfen Trompetenstofses gleicht, darf jedoch nur als Ausnahme, nicht als Regel verlangt und geleistet werden. Sie ist gefährlich. Nur zu leicht schlägt die Stimme dabei über und bleibt für den weiteren Verlauf angegriffen oder gar heiser. Die Natur duldet keine harten Wechsel; sie sucht Uebergänge, wenn deren kurze Dauer auch dem Gehör kaum den Eindruck macht, als seien sie vorhanden.) Ueber die unbetonten Zwischensilben schlüpft die Stimme schneller hinweg, um ihre Kraft auf die accentuirten Silben je nach dem Sinne des Inhalts zu verwenden. Es findet aber noch ein anderer sehr bemerkenswerther Vorgang hierbei statt. Der Ton setzt bei den accentuirten Silben kräftig ein, behält diese Kraft, welche sich durch die Wirkung der Reflexe verstärkt, jedoch nur kurze Zeit bei und klingt dann wesentlich schwächer beim Uebergange zur folgenden Silbe aus, so dafs dementsprechend auch nur abgeschwächte Reflexe dem direkten Ton

folgen und in der kleinen Pause zwischen den beiden Silben, ohne zu stören, erlöschen können. Die Wegedifferenz von 17 m wird also nur im höchsten Affekte bei einem kurz abgerissenen Ausruf — dem naturgemäſs eine verhältniſsmäſsig längere Pause zu folgen pflegt — zur Wahrnehmung gelangen, dann aber auch durch das deutlich hörbare Nachgellen der Reflexe den Eindruck machen, welchen der Darsteller zur Erschütterung seines Auditoriums nöthig hat.

§ 33.

Verständlichkeit des Vortrags. Geberden. Sorgfältige Aussprache der betonten Silben. Verhältniſs des Vortragstempos zur Gröſse des Raums. Gounod. Die Redekunst ein Erfahrungsresultat der Reflex-Wirkungen.

Andererseits merken die Zuhörer vorzugsweise auf die betonten Silben, die ihnen besonders verständlich werden, und errathen aus diesen im Zusammenhang mit dem Mienen- und Geberdenspiel des Darstellers die Zwischensilben viel mehr, als sie sie eigentlich verstehen. Die Uebermittelung des geistigen Inhalts geschieht beim Hören eines Vortrags nicht ganz so rasch wie bei dem Lesen. Bei dem letzteren hält das Auge sich auch nicht beim einzelnen Worte auf, es liest mit einem Blick den Satz und faſst die einzelnen Sätze rasch zum Gesammtgedanken der Periode zusammen. Die Anstrengungen, welche die Stimme im Auditorium zu machen hat, verzögern natürlich den Vorgang etwas, der sonst ganz ähnlich verläuft. Eins hat jedoch wiederum der Vortrag voraus: die Betonung und damit die augenblickliche Klarlegung des Gedankens, die Erleichterung der Auffassung, während der Lesende hierbei auf seine eigene Verstandesthätigkeit angewiesen ist. Die Betonung ist das Erkennungszeichen für den Sinn des Satzes; auf die unbetonten Zwischensilben achten wir kaum. Darum hat der Vortragende die charakteristischen, also betonten Silben besonders laut und deutlich zu bringen. Beachtet er dies, so wird er auch im raschen Tempo des Lustspiels immer verständlich bleiben. Ein Tempo von fünf Silben in der Sekunde ist schon recht rasch und brauchte nicht erhöht zu werden.

Die oben angeführte Stelle aus „Faust" habe ich von Hendrichs, Berndal und anderen guten Schauspielern mit einem Zeitaufwande von etwa acht Sekunden sprechen hören. Das macht bei dreiunddreißig Silben vier Silben auf die Sekunde oder für die Silbe 1/4 Sekunde. Für die betonten Silben wird man dies als durchschnittliche Zeitdauer in allen Fällen annehmen dürfen, während der Rest im Trauerspiel bei vier Silben, im Lustspiel etwa bei fünf Silben pro Sekunde von den unbetonten Silben und den Pausen in Anspruch genommen wird. Die Ausdehnung des Raums ist für das Tempo des Vortrags von besonderer Bedeutung. In einem sehr großen Saale macht eine mäßig rasche Rede bereits den Eindruck erheblicher Beschleunigung, wie Ch. Gounod in seiner Schrift: „Mozart's Don Juan" sehr richtig hervorhebt. Mit der Größe des Raums muß sich gleichzeitig der Vortrag verlangsamen, das weiß aus Erfahrung der Schauspieler, der Redner; und das Publikum verlangt es instinktiv, um bequem folgen und verstehen zu können.

Faßt man alle diese Erwägungen zusammen, so wird klar, daß die Redekunst sich aus der Erfahrung und dem Erfolge heraus so ausgebildet hat, wie das Bedürfniß verstanden zu werden und zu verstehen dies erforderte; daß sie also u. a. auch darin besteht, die Mitwirkung der für den direkten Ton günstigen Reflexe zu benutzen. Dem Baumeister wiederum liegt seinerseits ob, die Räume so anzuordnen, die Flächen so auszubilden, daß jenes Bestreben des Vortragenden dadurch erfolgreich unterstützt wird.

### § 34.

**Die Stärke des direkten Schalls der menschlichen Stimme auf 10 m Entfernung als Grundmaß oder Einheit. Die Gesammtwirkung der Reflexe die Wirkung des direkten Schalls überragend. Waldkirchen. Die Ausbildung der Wand- und Deckenflächen in größeren Räumen.**

Auf einem freien festgetretenen Platze ist, wie früher (§ 23) erwähnt, ein mäßig lautes, deutliches Wort 30—40 m weit zu verstehen. Ein Schauspieler, der ein klangvolles Organ besitzt und zu sprechen versteht, wie es seine Kunst erfordert, wird sich noch wesentlich weiter verständlich machen können. Nimmt

man an, dafs der Erdboden mit 50% Effekt reflektirt, so setzt sich die Wirkung der Stimme hierbei zusammen zu $^2/_3$ aus dem direkten Ton, zu $^1/_3$ aus den Reflexen der Erdoberfläche. Da die Kraft des direkten Tons zunimmt, wie die Entfernungen abnehmen, läfst sich hieraus diejenige Entfernung finden, auf welche der direkte Ton allein zum Verständnifs ausreichen würde: auf 20 m. Denn die Stärke des direkten Tons bei 30 m verhält sich zu der auf 20 m wie 2 : 3, und so ergiebt sich für 20 m Entfernung die Stärke $= {}^2/_3 \cdot {}^3/_2 = 1$. Der direkte Ton der menschlichen Stimme allein ohne irgend einen Reflex würde also auf 20 m Entfernung genügen. Dieses Mafs soll bei künftigen Erwägungen als Grundmafs dienen.

Gegen 20 m Entfernung sinkt die Intensität der Stimme bei 50 m Entfernung auf $^2/_5$ herab. Erscheint im Walde bei diesem Mafse durch die Mitwirkung der Reflexe die Gesammtintensität noch in der vollen Stärke, so kann dies nur geschehen dadurch, dafs die Summe der Reflexe $^3/_5$ der Intensität ergänzt. Dafs die Gesammtintensität der Reflexe die Intensität des direkten Schalls übertrifft, hat nichts, was anderen Erfahrungen widerspricht. Bei einem langen Korridor z. B. von 4 m Höhe und 6 m Breite mögen Sprecher uud Hörer vor den beiden Schlufswänden stehen. An den sechs einschliefsenden glattgeputzten Flächen finden sechs Reflexe statt, deren Wegedifferenzen gegen den direkten Schall ganz klein sind. Es käme also nur der Brechungsverlust zur Geltung und die Reflexe hätten zusammen eine Intensität von nahezu $6 \cdot 0{,}8 = 4{,}8$; wären also fast fünfmal so stark, als der direkte Schall. Dies stimmt völlig mit der Erfahrung überein. Jedermann weifs, dafs in einem solchen Gange in der That eine ganz bedeutende Schallverstärkung auf weite Entfernungen stattfindet.

Die günstigen akustischen Verhältnisse des Waldes hat man hier und da benutzt, um in der guten Jahreszeit die Sonntagsandacht dorthin zu verlegen; z. B. in Safsnitz auf Rügen. Von einer primitiven Kanzel herab kann dort ein guter Prediger Tausende erbauen. Die vortheilhafte Schallwirkung wird durch die aufserordentlich grofse Zahl der durch den Baumwuchs

dargebotenen Reflexflächen, dann aber dadurch erreicht, dafs keine dieser Flächen die Schallwellen anders als zerstreut und daher gemildert dem Hörer zuwendet. Bei der Gestaltung eines grofsen Zuschauerraums kann der Baumeister diese Erfahrung, indem er Decke und Wände zu einer ähnlichen Wirksamkeit gestaltet, zu benützen suchen. Die Flächen müssen getheilt, gerahmt, gegliedert und mit körperlichem Ornament ausgestattet werden. Glatte Flächen sind nur ausnahmsweise rathsam für Reflexe mit ganz geringer Wegedifferenz gegen den direkten Schall. Langhans hat 1810 in seiner Katakustik bestimmt und klar nachgewiesen, dafs in Zuschauerräumen auf elliptischer oder kreisförmiger Grundlinie die in Folge davon an gewissen Orten entstehenden lästigen Schallkonzentrationen am besten durch Reliefirung der Wände zu beseitigen sind. Man darf diesen für die Bauakustik fundamentalen Satz dahin erweitern, dafs in allen gröfseren Räumen, in welchen gesprochen oder Musik gemacht werden soll (und wo fände keins von beiden statt?) diejenigen Flächen, von denen störender Nachhall zu befürchten wäre, nicht eben belassen werden dürfen.

§ 35.

Schallzerstreuende Wirkung der Reliefs.

Bezüglich ihrer schallzerstreuenden Wirkung lassen sich alle Reliefs als zusammengesetzt aus Zylinder- oder Kugelflächen ansehen. Ist (Fig. 11) $C$ die Horizontalprojektion einer Zylinderaxe, $ABDE$ ein in drei gleiche Theile zerlegter Quadrant des Zylindermantels, $AFIE$ eine Schallwelle, die den Mantel in der Breite seines Radius $EC = 10$ cm trifft (bei der vorausgesetzten gröfseren Entfernung der Schallquelle ist zur Vereinfachung $IE$ parallel $AF$ angenommen), so wird bei der Reflexion Welle $AFGB$ von $AB$ über $FK$; $BGHD$ von $BD$ über $KL$; $DHIE$ von $DE$ über $LM$ zerstreut. $FK = KL = LM$ sind drei gleich grofse Mantelstücke eines Zylinders, dessen Grundkreis mit beliebigem Radius $CF$ um $C$ beschrieben sei. (Das Stück $MN$ kann bei einem gröfseren $CF$ vernachlässigt werden.) Die Kraft der Schallbewegung, welche sich

auf diese drei gleich grofsen Mantelflächen vertheilt, ist jedoch nicht gleich, sie entspricht den Wellenbreiten, durch welche der Zylinder $AC$ getroffen wird. Diese Breiten ergeben sich aus den Sinus der drei gleichen Winkel, in welche $ACE$ zerlegt ist: $\sin 30^\circ = 0,5$; $\sin 60^\circ = 0,87$; $\sin 90^\circ = 1$. Für den Radius $= 1$ verhalten sich also die drei Breiten wie $0,5 : 0,37 : 0,13$, und nach diesen Zahlen nimmt die Intensität der Reflexe in den drei Mantelstücken $FK$, $KL$ und $LM$ ab. Oder genauer und allgemeiner: theilt man den Quadranten $ABDE$ in unendlich viele Theile und setzt die Intensität einer sehr kleinen zentralen Schallwelle $FA = 1$, so ist die Intensität ihres Reflexes

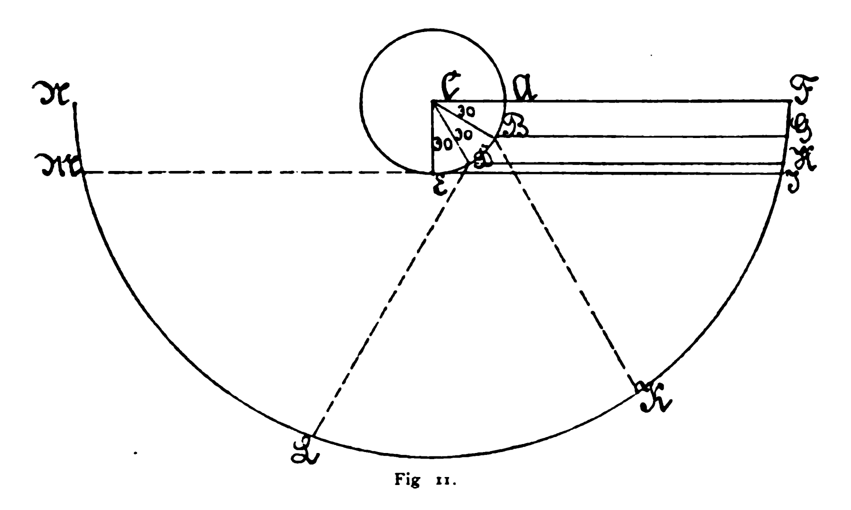



Fig 11.

auch $= 1$. Von 1 nimmt alsdann die Intensität der Reflexe der folgenden Schallwellen ab bis zu 0 für die äufserste den Zylinder in $E$ streifende Welle $IE$.

Von einer reliefirten Wand werden die Schallwellen nach einem Zuhörer von aufserordentlich vielen Ornamentflächen und unter den allerverschiedensten Winkeln — mehr und minder zentral bis zum Streifen — zurückgeworfen. Ist $CF = 5\,AC$, so vertheilt der Quadrant $ABDE$ die Schallbewegung über die zwei Quadranten $FKLM$, also über die $5 \cdot 2 = 10$fache Fläche, d. h. es sinkt die Intensität im allgemeinen bei dem fünfmal gröfseren Radius als Entfernung auf $^1/_{10}$ hinab. Bei $CF = 20\,AC$

(2 m) beträgt die durchschnittliche Zerstreuung $\frac{1}{2.20} = \frac{1}{40}$; bei $CF = 4$ m ist sie $\frac{1}{80}$. Bei einer Kugel quadrirt sich die Zerstreuung auf $\left(\frac{1}{40}\right)^2$ bezw. auf $\left(\frac{1}{80}\right)^2$. Bei einem Säulenschafte von 50 cm Halbmesser ist die Zerstreuung auf eine mittlere Entfernung von 8,5 m = 850 cm = $\frac{50}{2.850} = \frac{1}{34}$. Einen so starken Schaft wird man daher immer besser kaneliren.

Hiernach ist die Zerstreuung um so stärker, der Reflex also um so schwächer, je kleiner der Krümmungshalbmesser des Ornaments und je gröfser die Entfernung von demselben ist. Da dieser Krümmungshalbmesser selten 10—15 cm überschreitet, da Säulen- und Pfeilerschäfte gewöhnlich kanelirt werden, ist von solchen Oberflächen störender Nachhall nicht zu befürchten.

## § 36.

### Reliefirte Fläche. Gleiche Gesammtwirkung bei verschiedenem Mafsstabe der Reliefs.

Sieht man von der Wirkung des einzelnen Reliefs ab und betrachtet die Gesammtwirkung einer ganzen durchweg ornamentirten Fläche, so wird das Ergebnifs ein anderes. Denkt man sich eine Wellblechdecke, deren Wellen Zylinder mit dem Halbmesser = 1 bilden, so mag deren Reflexwirkung auf eine gewisse Entfernung = $a$ sein. Wird der Halbmesser der Wellen = $^1/_2$, so wird auch die Wirkung = $\frac{a}{2}$. Die Zahl der Wellen hat sich aber zugleich verdoppelt, die Gesammtwirkung ist also wieder = $a$. Tritt an die Stelle des Zylinders die Kugel vom Halbmesser 1 mit der Wirkung auf jene Entfernung = $b$, so können an Stelle dieser Halbkugel vier Halbkugeln vom Halbmesser = $^1/_2$ gesetzt werden mit der Wirkung jeder einzelnen = $\frac{b}{4}$, zusammen also $4 \cdot \frac{b}{4}$ wieder = $b$. Da nun auch bei jeder anderen Decke das Relief, mag es stärker oder schwächer

sein, in seiner Flächenausdehnung zu der ebenen Grundfläche in einem gewissen künstlerischen Verhältnifs bleiben mufs, so wird auch bei einer solchen Deckenfläche die Reflexwirkung — unter sonst gleichen Umständen — stets dieselbe sein. Der Baumeister kann also nach seinem freien Gefühl kräftigeres oder zarteres Relief verwenden, ohne einen Unterschied von Belang in dem akustischen Effekt befürchten zu müssen.

## § 37.

### Gesammtwirkung einer reliefirten Fläche.

Die Reflexwirkung einer reliefirten Fläche wird gegen die einer glatten Putzwand in der Intensität zurückbleiben, hat dafür aber den grofsen Vorzug, dafs sie allmählich beginnt und ebenso aufhört, während der Reflex der Putzwand doch noch immer mit einer gewissen Schärfe einsetzt. Man kann sich den Effekt einer Wellblechdecke von 50 m Länge für den 3 m darunter befindlichen entferntesten Sitz etwa folgendermafsen vorstellen: es würden an dieser Decke $50 \cdot 5 = 250$ Halbzylinder von 10 cm Halbmesser Platz finden. Jede Zylinderfläche würde nach jenem Sitze hin die sie treffenden Schallwellen zerstreuen und zwar auf eine durchschnittliche Entfernung von

$$\frac{3 + 49}{2} = \frac{52}{2} \text{ m}$$

der durchschnittliche Zerstreuungseffekt aller Zylinder wäre also

$$\frac{250 \cdot 10}{2 \cdot \frac{3 + 49}{2}} = \frac{250}{520} = 0{,}48$$

oder annähernd gleich der Hälfte der Reflexwirkung einer ebenen Putzfläche. Da indefs die Reliefirung etwa nur $^2/_5$ der Gesammtfläche einnimmt, der Rest mit $^3/_5$ als Grundfläche eben bleibt, wird man die Gesammtwirkung einer reliefirten Fläche zu $^4/_5$ der ebenen Putzfläche $= {}^4/_5 \cdot 0{,}80 = 0{,}64$ annehmen können. Dieser Werth steht zu dem ermittelten Werthe für eine gefugte Mauerfläche (87% eben, 13% Fugen) mit 0,75 Reflexwirkung in richtigem Verhältnifs.

## § 38.

### Die für die Reflexion erforderlichen und die überflüssigen Zonen des Reliefs. Wirkung ganz flacher Reliefs.

Faſst man die Zerstreuung des Schalls durch einen Halbzylinder etwas genauer ins Auge, so kann man sich bald überzeugen, daſs ein Mantelstück über einem bestimmten Flachbogen dieselben Dienste leisten würde. Sind in dem Beispiele des 50 m langen Saales der Vortragende wie der Zuhörer (Fig. 12)

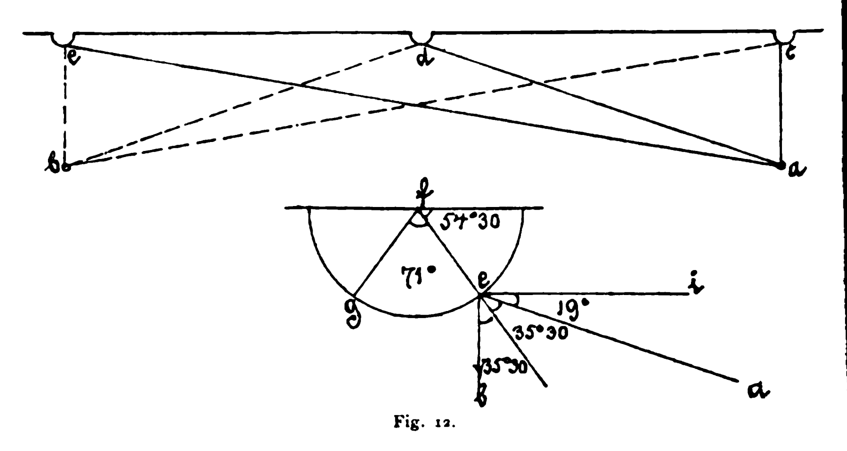



Fig. 12.

8,5 m von der Decke entfernt und durch die ganze Länge des Raumes von einander getrennt, so müssen folgende Bedingungen erfüllt werden: Der Zuhörer in *b* muſs von jedem Halbzylinder der Decke einen Reflex erhalten. Dies geschieht, indem die von *a* senkrecht nach oben steigende Schallwelle von *c*, die schräg nach der Mitte der Decke gehende von *d*, die noch flachere nach dem letzten Halbzylinder der Decke von *e* nach *b* hinabgelenkt werden. Der Winkel *aei*, den die Richtung *ae* mit der Horizontalen macht, ist nach den gegebenen Maſsen = 19°. Der Winkel, den der Reflexionspunkt *e* des Zylindermantels mit dessen Mittelpunkt und der Horizontalen einschlieſst, ist = 54° 30′. Soll *eb* senkrecht werden, so ergiebt eine einfache Winkelrechnung, daſs der Zentriwinkel *efg* = 71° ist. Da die Reflexion der Schallwelle *acb* unter denselben Verhältnissen, wenn auch umgekehrt, geschieht; da die reflektirenden Punkte an allen dazwischen liegenden Zylindern in der Weise

erfolgt, daſs die Reflexion von der linken Seite des Zylinders bei *c* über die Mitte bei *d* nach der rechten Seite bei *e* hinüberrückt — so ist klar, daſs der Bogen *eg* genügt, damit das Relief an der ganzen Decke seinem Zwecke entspricht. Die Sehne *eg* ist bei $71° = 1{,}26$ Radius, während der Halbzylinder die Breite von 2,00 Radius beansprucht. Könnte man die ganze Decke mit solchen Zylinderstücken von 71° reliefiren, so würde sich der Reflexionseffekt von 0,5 heben auf $\frac{0{,}5 \cdot 2{,}00}{1{,}26} =$ rot. 0,80. Wird der Bogen kleiner als 71°, so wächst dieser Effekt noch weiter, obwohl an den beiden Enden der Decke die Reliefs bei *c* und *e* die Wellen nicht mehr von *a* nach *b* lenken können. Nur der mittlere Theil der Decke reflektirt. Dieser Theil wird geringer, je flacher der Bogen wird. Bei unendlich kleinem, flachem Bogen wird die Decke eine Ebene und reflektirt mit dem Effekt = 1,00, der sich, wie wir früher gesehen haben, bei einer Putzfläche durch deren Rauheit auf 0,80 reduzirt.

Für die Reflexwirkung wäre also flaches Relief noch vortheilhafter zu verwenden, wie halbrundes. Letzteres wird der kräftigeren Schattenwirkung wegen gewöhnlich vorgezogen. Der Raum, den es unnützt einnimmt, macht sich übrigens durch die mehrmalige Reflexion, die an Halbzylindern stattfindet, einigermaſsen wieder bezahlt.

## § 39.

### Einschränkung der Reflexwirkung.

So wünschenswerth die Unterstützung durch die Reflexe bei einer Entfernung der Zuhörer von der Schallquelle über 20 m hinaus ist, so unnöthig ist sie bei den Entfernungen innerhalb dieses Maſses, bei welchen der direkte Ton allein schon hinlänglich stark zum Verständnisse ist. Man wird also suchen müssen die Wandflächen, welche den Ton nach den seinem Urspruug näher liegenden Plätzen reflektiren könnten, mit Rappputz oder Draperieen zu versehen, welche die Kraft des Schalles brechen. Gegen den übermäſsigen Eindruck des direkten Tons schützt sich das Ohr, wie früher erläutert, durch

sein Accomodationsvermögen. Orchestermusik, bei welcher sich Blas- und Schlaginstrumente leicht unangenehm vordrängen, wird auf geringe Entfernungen in der That eine Pein für Jeden, der ein empfindliches Gehör besitzt. Einen befriedigenden Gesammteindruck der Musik kann man nur auf weiteren Abständen, also aus der entfernteren Hälfte des Raumes erwarten.

## § 40.

### Reflexwirkung der Zuschauerreihen.

Aufser den Wandreflexen, deren Einflufs sich also nöthigenfalls wesentlich verringern läfst, giebt es indessen Reflexe, bei denen dies nicht thunlich ist: die Reflexe aus den Zuschauerreihen selbst, auf deren Wirkung bisher mit Unrecht gar keine oder höchstens eine untergeordnete Aufmerksamkeit verwendet worden ist. Die Thatsache, dafs in einem leeren Zuschauerraum sich ein störender Nachhall bemerkbar macht, dafs man dagegen bei vollem Hause wesentlich besser hört, war wohl bekannt, ohne aber eine Begründung zu erfahren.

Leere Sitzreihen mit Holzgestellen und straffem Rohrgeflecht geben wahrscheinlich durch die Resonanz jenen surrenden Reflex, den man bei einiger Aufmerksamkeit in grofsen Sälen deutlich hören kann. Sind die Stühle besetzt, so ist das Schwirren und die Resonanz zur einfachen Reflexion abgedämpft. Der ganze Raum über dem Fufsboden ist nunmehr in 1,30 m Höhe mit reflektirenden Flächen dicht angefüllt und unterstützt hierdurch den direkten Schall in einer sehr vortheilhaften und kräftigen Weise. Für jeden Platz schliefsen sich an den direkten Schall mit demselben auf das Innigste verschmelzend die Reflexe aus der nächsten Nachbarschaft und mit der geringsten Wegedifferenz, an diese die entfernteren u. s. w. an. Die aufserordentlich hohe Zahl dieser Reflexe summirt sich, weil jeder einzelne stark gebrochen ist, zu einer abgerundeten, niemals störenden, erheblichen Wirkung.

## § 41.

**Die Akustik der antiken Theater. Minderung der Reflexwirkungen bei Zuschauerreihen auf einer Ebene.**

Die antiken Theater hatten trotz ihrer gigantischen Abmessungen eine gute Akustik, deren erste Ursache in der Anordnung der Sitzreihen auf einem stark ansteigenden Hohlkegel zu suchen ist. Noch bessere Formen sind Hohlkugel und Hohlellipsoid, weil hierbei die entfernteren Reihen in immer höheren Stufen steigen, die Plätze dort also immer freier und der Wirkung aller Reflexe immer zugänglicher werden. Sind dagegen die Sitze in einer Ebene angeordnet, so kann nur ein kleiner Theil der Reflexe aus nächster Nachbarschaft wirksam werden; alle anderen werden abgeschnitten dadurch, dafs die Zuschauerreihen gegenseitig sich decken. Es giebt dies ein Mittel an die Hand, die Reflexe dort, wo sie nicht mehr erforderlich sind, also in der Nähe der Schallquelle, möglichst zu beseitigen. Hiernach ist es zu empfehlen, die ersten 20 m eines Zuschauerraumes oder Konzertsaales in eine Ebene zu legen und dann in eine steigende, zuerst leicht, dann stärker gekrümmte Fläche überzugehen.

## § 42.

**Die Schallverbreitung in einem Saale von 1800 qm Grundfläche. Stärke der Reflexwirkung aus den Zuschauerreihen. Gesammtwirkung für den entferntesten Sitzplatz.**

Das Ergebnifs der bisherigen Entwickelung wird sich am besten an einem Beispiel übersehen lassen. In Fig. 13 und Fig. 14 ist mit den Linien *ABCD* ein Saal von 50 m Länge, 36 m Breite und 17 m Höhe im Grundrifs und Längsschnitt dargestellt. An denselben schliefst sich eine Nische *EFGH* von 6 m Länge und 20 m Breite an, welche das Podium, bequem ausreichend für 120 Musiker, enthält. Der Punkt *a* soll den Kopf des Darstellers oder Sängers auf diesem Podium, *b*, *c*, *d* sollen die der Zuhörer auf 25 m, 35 m und 50 m Entfernung von *a* bedeuten. Die Zuschauersitze sind von 20 m ab in wachsendem Verhältnifs mit der Entfernung überhöht, so dafs der Abstand der letzten Reihe von der Decke nur wenige

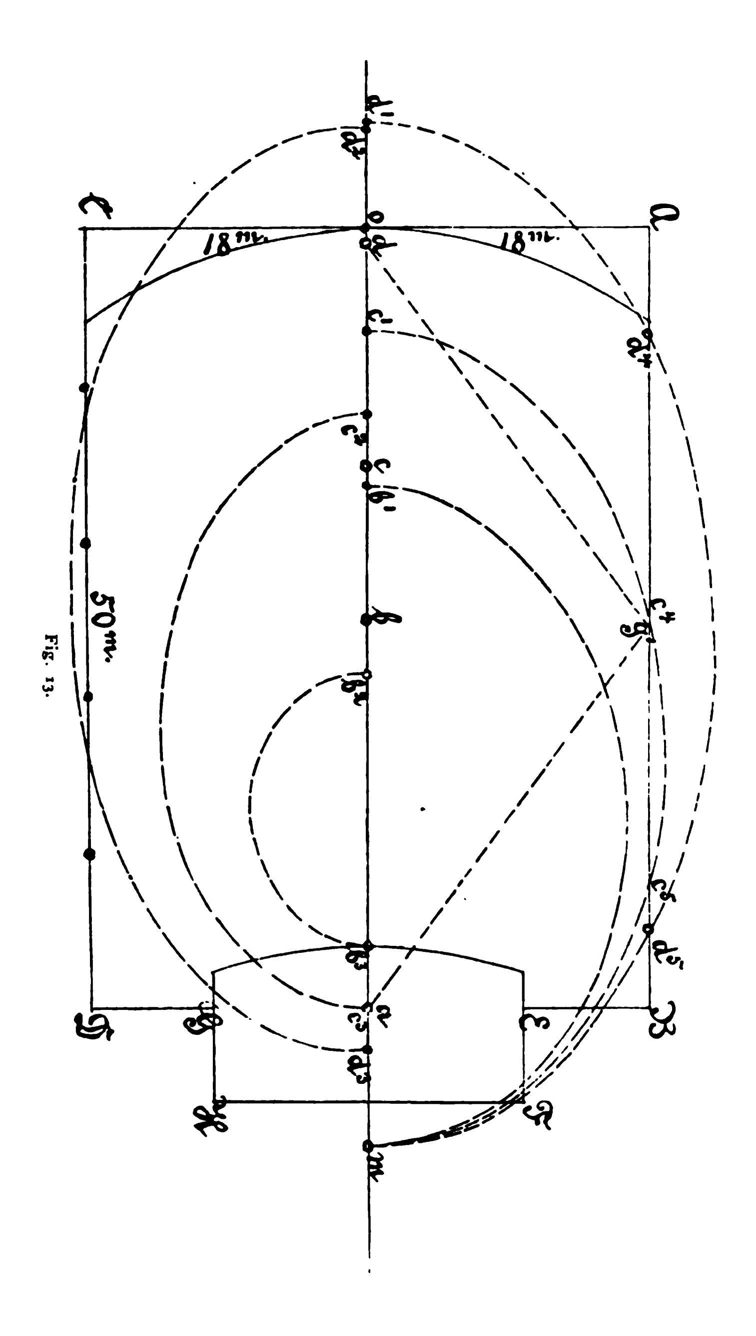



Fig. 13.

beträgt. Denkt man sich nun $a$ einerseits und $b$, $c$, $d$ rseits als Brennpunkte Ellipsen mit 17 m Wegedifferenz ieben und diese Ellipsen um ihre Längsachsen gedreht, erden hierbei und Wände in n geschnitten ı, welche die ne brauchbare ion geeigneten n einschliefsen. Kurven $b^2 - b^3$ den Theil der nfläche ein, der f $b$, $c^2 - c^3$ den, h auf $c$, $d^2 - d^3$ ı den, der sich bezieht, wenn llipsen in der der Zuschauer- um ihre grofsen n $b' - m$, $c' - m$, gedreht wer- ie Längswände ı von $b' - m$ gar erreicht, da- von $c' - m$ in ırve $c^4 - c^5$, von in der Kurve 's geschnitten. 3lick auf die ungen genügt, erkennen, wie ßsen der reflek- n Flächen mit ıtfernung wachsen, und die Wegedifferenzen gegen den en Schall abnehmen. Die sich mindernde Kraft der

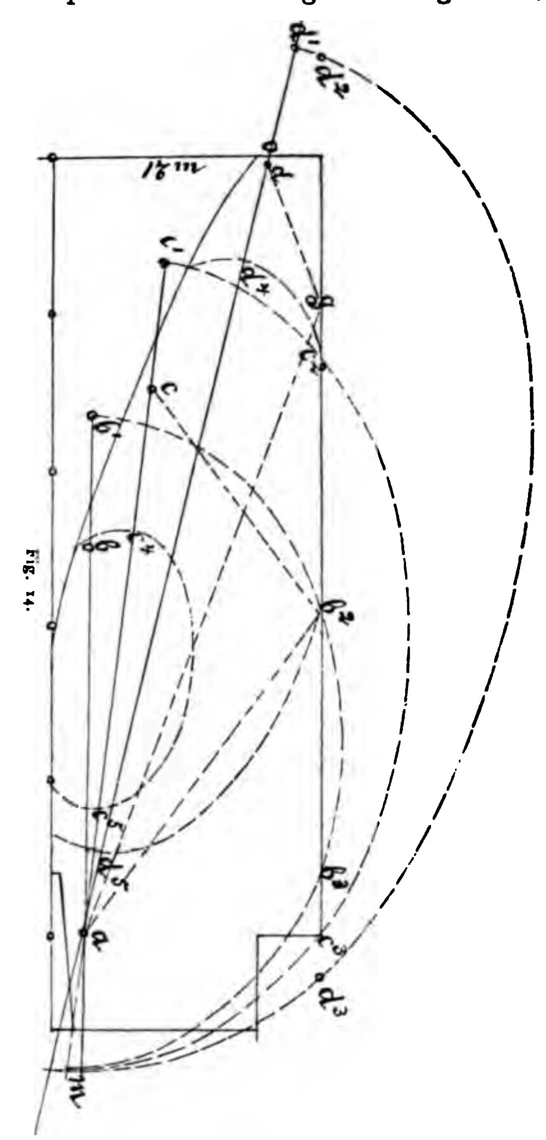


Fig. 14.

direkten Schallwelle wird durch die sich steigernde Wirkung der Reflexe zu einem erheblichen Theile wieder ergänzt.

Für den Eindruck, welches ein in *a* gesprochenes Wort auf den am meisten entfernten Zuhörer in *d* macht, wird am besten diejenige Wirkung zu Grunde gelegt, den der direkte Schall auf 20 m Entfernung erzeugt, wo er ohne jeden Reflex allein zum Verständnifs ausreichen würde. Setzt man nach § 34 diese Schallstärke = 1, so hat der direkte Schall auf 50 m in *d* eine Stärke $= \frac{20}{50}$ oder $= {}^2/_5$. Auf diese Stärke von zwei Fünfteln würde man nun nach den früheren Ausführungen die Stärken der Reflexe von Decke und Wänden beziehen und berechnen können. Es fehlt dann aber noch ein sehr wesentlicher Faktor: die Reflexwirkung aus den Zuschauerreihen. Wie grofs ist dieselbe? Durch praktische Versuche kann sie nicht ermittelt, sie kann nur durch Vergleiche geschätzt werden. Hierzu bieten die Verhältnisse der antiken Theater einen Anhalt. Wo die Sitzreihen annähernd erhalten sind, hört man dort auf den äufsersten Plätzen noch heute das auf der Szene gesprochene Wort überraschend gut bei dem gewöhnlichen Durchmesser des Zuschauerraums von 100—120 m. Bei einem Abstande der letzten Reihe von der Bühne = 60 m ist die Stärke des direkten Schalls auf $\frac{20}{60} = {}^1/_3$ gesunken. Wurde auf dieser Reihe noch verstanden, so mufsten die Reflexe zwei Drittel der Einheitstärke ergänzen. Von diesen zwei Dritteln wird man ein Drittel auf den Reflex des Podiums und die nicht sehr erheblichen Reflexe der Dekorationen der Bühne, und ein Drittel auf die Reflexe aus den Zuschauerreihen zu rechnen haben. Das herkömmlich hölzerne Podium reflektirt bei der nur geringen Wegedifferenz mit 80%, der Rest der Szene mit 20% der Stärke des direkten Schalls, zusammen also gleich diesem mit einem Drittel. Auch noch auf einem anderen Wege kommt man zu gleichem Resultat. Im Walde hatten (§ 34) auf 50 m Entfernung die Reflexe eine Gesammtstärke von drei Fünfteln der Einheitstärke; der direkte

Schall eine solche von zwei Fünfteln. Denkt man sich durch den Kopf des Zuhörers eine Horizontalebene gelegt, so wird man nicht unberechtigt sein, jene drei Fünftel zu einem Fünftel auf den Erdboden, zu einem Fünftel auf die Reflexe über demselben bis zur Horizontale und zu einem Fünftel auf die Reflexe über der Horizontalebene zu vertheilen. Die Summe der Reflexe unter dieser Ebene würde also zwei Fünftel oder die Stärke des direkten Schalls (wie oben) darstellen. Auch bei den Zuschauerreihen Fig. 14 finden bezüglich einer solchen durch die Köpfe des Zuhörers und des Vortragenden gelegten Ebene ganz ähnliche Verhältnisse statt. Unterhalb derselben giebt es eine aufserordentlich grofse Zahl reflekrtirende Flächen an regelmäfsig und dicht über den ganzen Raum vertheilten Körpern.

Wenn nun für den Punkt *d* eine Berechnung der nachweislichen Reflexwirkungen versucht wird, so geschieht dies, weil bestimmte Zahlen am besten ein übersichtliches Bild geben von den Intensitätsverhältnissen, mit welchen die verschiedenen Flächen bei der Schallvertheilung thätig sind. Das Gesammtergebnifs wird alsdann doch noch durch Einflüsse, die nur schwer zu schätzen sind, theils erweitert, theils eingeschränkt werden müssen.

1. Der Punkt *g*, aus welchem die Reflexion der Decke beginnt, bringt einen Umweg = 52 m gegen den Weg des direkten Schalls; der Reflex von dort vermindert sich in seiner Kraft auf $\frac{50}{52} = 0{,}96$, die Gesammtwirkung der reliefirten Decke beträgt also $0{,}96 \cdot 0{,}64 =$ . . . . . . . . . . . 0,61
2. Punkt *o* der reliefirten Schlufswand hat denselben Umweg; ihre Wirkung daher = . . . . 0,61
3. Punkt *g'* der Langwand hat einen Umweg von 61,6 m: $\frac{50}{61{,}6} = 0{,}81$; ihre Wirkung $0{,}81 \cdot 64 =$ . . 0,52
   Denselben Effekt hat die gegenüberliegende Langwand . . . . . . . . . . . . . 0,52

Seite 2,26

Uebertrag 2,26

4. Die Wirkung der Reflexe aus den Zuschauerreihen ist oben hergeleitet = . . . . . . . 1,00
5. Der Reflex des Podiums hat einen Weg von 51 m. Der Effekt der ungestrichenen Bretter ist = 0,85;
$0{,}85 \cdot \frac{50}{51} =$ . . . . . . . . . . . . . . . 0,83
6. Die Rückwand der Orchesternische liegt 6 m von *a* entfernt. Die Kraft der menschlichen Stimme ist rückwärts nur ein Drittel derjenigen vorwärts:
$\frac{50}{50+2 \cdot 6} \cdot 0{,}64 \cdot {}^1/_3 =$ . . . . . . . . . . . . 0,17
7. Der direkte Schall ist = . . . . . . . . . . 1,00

Gesammtwirkung in *d* = 5,26

Der direkte Schall ist = ²/₅ der Schallwirkung auf 20 m (der Schalleinheit); die Gesammtwirkung auf 50 m in *d* beträgt daher auf die Schalleinheit bezogen $5{,}26 \cdot \frac{2}{5} = 2{,}1$, d. h. die Wirkung in *d* ist doppelt so stark, als zum Verständnifs ausreichen würde.

## § 43.

### Mehrmalige Schallbrechung.

Aufser den einmal gebrochenen Reflexen giebt es in immer steigender Zahl Reflexe mit zwei-, drei- und mehrmaliger Zurückwerfung des Schalls, die schliefslich zum Ohr des Zuhörers gelangen, Der Kürze wegen sei gestattet, sie nach der Zahl der Brechungen als Reflexe zweiter, dritter u. s. w. Ordnung zu bezeichnen. Findet die Brechung an ebenen Putzflächen statt, so würde, abgesehen von den Verlusten durch die weiteren Wege, die Wirkung der Reflexe mit doppelter Brechung auf $0{,}80 \cdot 0{,}80 = 0{,}64$, mit dreimaliger Brechung auf $0{,}80^3 = 0{,}51$ u. s. w. verringert werden. Höherer Ordnung als sechster mit 0,26 Reflexwirkung wird, da zugleich die Wege immer länger werden, kaum Beachtung geschenkt zu werden brauchen. Von den Reflexen zweiter Ordnung sind die zwischen den ebenen Flächen des Podiums, der Wände

ıd der Decke die wirksamsten, dann kommen die zwischen esen Flächen und den Reliefs. Jedes Relief paart sich mit ṅ Nachbarreliefs (Fig. 15), aber auch mit allen Reliefs der ıderen Wände. Man kann den Einfluſs deutlich hören über-l, wo zwei Wände zusammenstoſsen, noch besser, wo sie mit ṙ Decke einen Winkel bilden. Noch mehr steigt bis zur

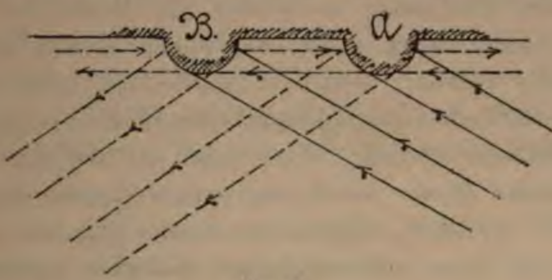



Fig. 15.

nübersehbarkeit die Zahl der Kombinationen bei den Re-ẋen höherer Ordnungen, und die Gesammtwirkung würde s zur Lästigkeit gesteigert werden, wenn dieser Ueberfluſs cht durch einen weiteren Vorgang auf ein günstiges Maſs ṙabgemindert würde: durch das Eintreten der Inter-ṙenzen.

## § 44.

### Interferenzen.

Fallen zwei Schallwellen derart zusammen, daſs die posi-ve Phase der einen die negative der andern deckt, so heben e sich, wenn sie gleich lang und stark sind, gegenseitig auf. ei verschiedenen Intensitäten wirken sie mit der Differenz erselben. Bei gleichen Phasen summiren sich die positiven zw. negativen Intensitäten. Läſst man einen Ton ein Schall-ıhr passiren, welches sich in zwei Zweige vom halben Quer-chnitt theilt, deren einer um die halbe Wellenlänge des Tons ürzer ist, als der andere, so erlischt bei der Wiedervereinigung er Zweige der Ton, da hier alsdann positive und negative hase, Verdichtung und Verdünnung, aufeinander fallen und ch gegenseitig vernichten. Diese Nörrenberg'sche Interferenz-

röhre beweist zugleich die Richtigkeit der Wellentheorie bei der Schallbewegung.

Eine solche vollkommene Aufhebung findet jedoch nur in einer derartigen Vorrichtung statt. In einem gröfseren Raume gestalten sich die Interferenzen der Reflexe unter wesentlich anderen Bedingungen. Um in diesem Meere von Schallwellen durchzufinden, wird man am besten die Welle des direkten Tones zu Grunde legen, zumal sie immer stärker bleibt, als jeder einzelne Reflex. Weil sie stärker ist, kann sie durch einen einzelnen Reflex entgegengesetzter Phase nur geschwächt nicht aufgehoben werden. Wohl aber ist der Fall denkbar, dafs die direkte Welle durch eine entsprechende Summe solcher Reflexe gänzlich aufgehoben werden könnte unter der Voraussetzung eines unbeweglichen tönenden Punktes einerseits und eines feststehenden hörenden Punktes andererseits. Rayleigh hat (Theorie des Schalls; S. 134. Braunschweig 1879, Vieweg u. Sohn) einen lehrreichen Versuch, der dasselbe ausdrückt, mit zwei Stimmgabeln unternommen, die 10 Yards von einander entfernt, jede auf einem genau abgestimmten Resonator standen. Sie wurden elektromagnetisch in demselben Moment in Bewegung gesetzt, machten 256 Doppelschwingungen in der Sekunde und gaben, wenn das eine Ohr geschlossen wurde, für das andere Ohr sehr genaue Punkte der Stille. Aber eine Bewegung von etwas mehr als einem Zoll aus diesen Punkten heraus genügte schon, um den Ton merklich wieder hervortreten zu lassen. Eine Interferenz für beide Ohren erwies sich als unmöglich. In einem Konzertsaal, einem Versammlungsraum bewegt der Vortragende den Kopf, selbst den Oberkörper bald rechts, bald links, weil eine unbewegliche Haltung ihn gerade so ermüden würde, wie den Zuhörer, der seine Haltung ebenfalls vielfach ändert. So können Punkte völliger Stille für keins der Ohren anders als ganz vorübergehend stattfinden; und wenn es geschieht, so bleibt immer das andere Ohr hörend.

Von dem Klange der Stimmgabel, welcher aufser dem Grundton nur schwache hohe Obertöne hat, unterscheidet sich

esentlich (§ 11) die menschliche Stimme, welche bis zu
chszehn kräftig entwickelte Obertöne besitzt. Setzt man
ig. 16) aus ihrem Grundton *acd* und den Obertönen *ah*, *ah*,
u. s. w. die Intensitätskurve *abdefgh* der menschlichen
imme zusammen, so zeigt die scharfe Spitze bei *b*, wie genau
e entgegengesetzten Phasen aufeinander fallen müssen, um
ch aufzuheben. Bei dem reinen Grundton, welcher dem der
immgabeln entspräche, würde der Scheitel *c* der Kurve *acd*
ch bei einer kleinen Verschiebung der Phasen immer noch
sreichend interferirt werden, während bei der Kurve *abd*
s geringste Rücken die Spitzen *b* auseinander fallen und die

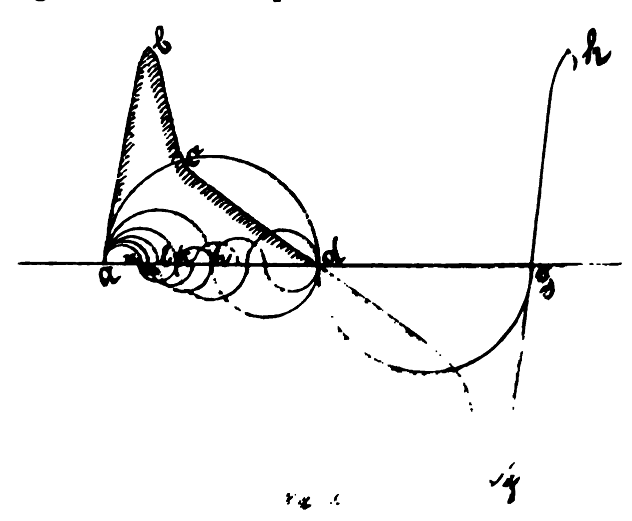



Fig. 16.

terferenz mißlingen läßt. Die Kugelschalen, in welchen die
axima der Verdichtung bzw. Verdünnung der Stimmgabel-
ne vorwärtsschreiten, bilden gleichsam eine breitere
chicht, als die Schalen der Maxima der menschlichen
imme, die in den Spitzen *b*, *f*, *h* eine dünne Haut dar-
ellen. Jene haben nur zwei Mittelpunkte, deren [illegible]
terferirende Schalen sich in einem körperlichen [illegible]
einem Ringe schneiden; diese haben [illegible]
r direkten Umwelle mit allen Kurven [illegible]
ttelpunkten mit [illegible] hundert-
send Schnittkreise sämmtlich durch [illegible]

Punkt gehen müssen, um sich aufzuheben. Tritt der Stimmgabelton bei einer Bewegung von etwa einem Zoll für das nicht geschlossene Ohr wieder hervor, so mufs für dasselbe Ohr die menschliche Stimme schon bei der Bewegung des Athmens, des Pulsschlags auch wieder hörbar werden. Der Interferenzpunkt hat hier nur bei den (tiefen) Tönen von gröfserer Wellenlänge eine gewisse Körperlichkeit; je kleiner die Wellenlängen, je höher die Töne werden, um so mehr schrumpft er zum mathematischen Punkt zusammen und um so geringer wird sein Einflufs auf das Gehörorgan, dessen Längenausdehnung mit dem Gehörgange doch immerhin etwa 40 mm beträgt. Hierdurch wird die empfindliche Wirkung der hohen Töne, bei denen die mildernden Interferenzen verschwinden, erklärlich. Aber auch bei den Tönen der mittleren und tiefen Lage ist ein vollständig gegenseitiges Sichaufheben aller Einzeltöne ebenso aufserordentlich selten zu erwarten, wie eine vollständige Summation ohne die geringste Aufhebung. Setzt man jenes = 0, diese = 1, so müfste die Durchschnittswirkung für jedes Ohr = 1/2 sein. Als Regel aber wird man anzunehmen haben, dafs die Intensitäten etwa von zwei Fünftel bis drei Fünftel schwanken. Bei der sich ergänzenden Thätigkeit beider Ohren werden die geringeren Wirkungen zwar bemerkt, nach den gröfseren Eindrücken aber geurtheilt werden. Für das Gehör werden die unvollkommenen Summationen (drei Fünftel) mafsgebend und entscheidend sein, die ebenso oft auftreten, wie die unvollkommenen Aufhebungen. Auch hier steigert sich die Zahl der Summationen mit der Schwingungszahl der höheren Töne, deren Uebergewicht über die tieferen auch in dieser Hinsicht aus den Interferenzen herzuleiten ist. Aus den stärkeren Eindrücken, die genügend oft sich wiederholen, aus den drei Fünftel Summationen schätzt unser Gehör die Stärke des Klanges ab.

Dafs der direkte Klang durch die Reflexe in der That ganz erheblich verstärkt wird, trotz der Interferenzen, dafür liefert den besten Beweis die Messung von Vierordt (§ 19). Nach dem bis in die neueste Zeit als giltig angenommenen

Gesetze der Schallverminderung im Verhältnifs der Quadrate der Entfernungen hätte es bei der zweiundzwanzigfachen Entfernung der $22^2 = 484$fachen Schallstärke bedurft, um die Hörbarkeit (die Reizschwelle) hervorzurufen. Aber auch bei der durch erschöpfende Versuche erwiesenen Schallabnahme im Verhältnifs der einfachen Entfernungen würde ohne die Mitwirkung der Reflexe die zweiundzwanzigfache Schallstärke erforderlich gewesen sein. Wenn nun die 4,6fache Stärke zur Hörbarkeit genügte, so hat dies doch nur durch die Thätigkeit der Reflexe erreicht werden können. Die Wirkung derselben verfünffachte also nahezu die Intensität des direkten Schalls!

Durch diese Messung wird eine Erfahrung bestätigt, die schon seit längerer Zeit keinem Baumeister, welcher sich eingehend mit der Schallausbreitung im begrenzten Raum beschäftigt hatte, ein Geheimnifs war.

Der Saal, in welchem Professor Vierordt den Versuch anstellte, war 10 m lang, 5,4 m breit und 4,8 m hoch; die Entfernung zwischen Schallquelle und Zuhörer 5 m lang in der Längsachse des Raumes. Schallquelle und Zuhörer standen je 2,5 m von den Schlufswänden ab. Die Reflexe dieser Schlufswände hatten $2 \cdot 2{,}5 + 5 = 10$ m, also den doppelten Weg des direkten Schalls zu machen, verringerten demnach ihre Kraft auf die Hälfte. Hierzu der Reflexionsverlust an den Wänden = 0,20, giebt für die beiden Schlufswände eine Reflexwirkung: $2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0{,}80$. Die Reflexe an den beiden Längswänden haben einen Weg = 7,32 m zu durchlaufen. Ihre Wirkung ist also $= 2 \cdot \frac{5{,}0}{7{,}32} \cdot 0{,}8 = 1{,}09$. Der Reflex der Decke hat einen Weg = 8,6 m, seine Wirkung $\frac{5{,}0}{8{,}6} \cdot 0{,}8 = 0{,}46$. Der Reflex des Fufsbodens endlich, über dem Instrument und Zuhörer 1,3 m hoch sich befinden, macht einen Weg = 5,6 m, sein Effekt ergiebt sich $= \frac{5{,}0}{5{,}6} \cdot 0{,}85 = 0{,}76$.

Die sechs Reflexe summiren sich:

0,8 + 1,9 + 0,46 + 0,76 = 3,11
und mit dem direkten Schall = 1,0

auf zusammen 4,11, während die Messung ergeben hat 4,6. Die Berechnung der Reflexwirkungen, wie sie in dieser Abhandlung zu begründen und zu entwickeln versucht worden ist, bleibt gegen das Gesammtergebnifs der thatsächlichen Schallstärke um rot. 10 Prozent zurück. Ausgeschlossen von der Berechnung, da sie sich einer solchen entziehen, sind geblieben einerseits die Wirkungen aller Reflexe höherer Ordnungen sowie der Resonanzen, andererseits die Wirkungen der Interferenzen. Nach obigem Ergebnifs ist man zu dem Schlufs berechtigt, dafs der schallmindernde Einflufs der Interferenzen durch die schallverstärkende Kraft der Reflexe höherer Ordnungen und der Resonanzen nicht nur aufgehoben, sondern von den letzteren noch jener Rest von 10 Prozent übrig geblieben ist, um den die thatsächliche gemessene Schallstärke die aus dem direkten Schall und den Reflexen erster Ordnung hergeleitete Schallstärke überragt hat.

In § 21 ist bereits erläutert, dafs für mit Tönen gemischte Geräusche dieselben Gesetze herrschen, wie für mit Geräuschen gemischte Töne. Es bleibt zu untersuchen, ob dies auch für die Schallinterferenzen zutraf bei dem Versuche Vierordts. Die Klangfiguren Cladni's, Savarts, Kirchhofs haben ergeben, dafs elastische Platten von Kreisform und von allen in einen Kreis eingeschriebenen gleichseitigen Figuren in regelmäfsige Schwingungen gerathen, wenn ihr Rand mit einem Violinbogen gestrichen wird. Je nach der angegriffenen Randstelle wechseln die symmetrischen Knotenlinien und die entstehenden Töne. Plattenförmige Stäbe haben ihren bestimmten Ton; es werden aus ihnen musikalische Instrumente: Glockenspiele, Harmonikas zusammengesetzt. Aber auch bei allen anderen Grundformen schwingen Platten, die aus Holz, Elfenbein, Glas, Metall bestehen, sobald man eine angeschlagene Stimmgabel auf sie setzt, den Ton der Gabel bedeutend verstärkend, mit. Aufserdem aber zeigen sie, wenn sie in Schwingungen versetzt werden,

jede einen in dem hervortretenden Geräusch erkennbaren Grundton, dessen Höhe auf dem Klavier bestimmt werden kann. Wie bei der Holzplatte § 21 wird man auch bei dem Vierordtschen Elfenbeinplättchen neben den regelmäfsigen Schwingungen des Grundtons noch weitere Schwingungen hören, die alle an sich regelmäfsig sein dürften, deren Schwingungszahlen sich aber nur so von einander unterscheiden, wie etwa die nebeneinander liegenden Töne einer Oktave. Die Aus- und Einbiegungen der Flächentheile des Plättchens können, wie die Bewegungen einer elastischen Saite, kaum anders als pendelförmig gedacht werden. Für das aus ihnen zusammengesetzte Geräusch würden also auch die Interferenzgesetze gelten. Es spricht für diese Annahme der unveränderliche Charakter des Geräuschs, dessen Farbe während der ganzen Dauer immer dieselbe bleibt, mag man das Plättchen in stärkere und längere oder schwächere und kürzere Vibrationen versetzen. Selbst wenn man trotz aller Unwahrscheinlichkeit das Entstehen unregelmäfsiger Schwingungen voraussetzen wollte, so würde doch nur das Gesammtergebnifs der Interferenzen etwas modifizirt werden. Im Ohre des Zuhörers ist es möglich, dafs bei den Tönen die direkten Wellen und die **gleichlangen** reflektirten fast völlig auf einander fallen, sich positiv oder negativ summiren oder bis zur Gesammtdifferenz aufheben. Es können alle Wellenreihen sich mehr oder minder positiv **decken**. Ungleichartige Wellen mögen vielleicht zufällig annähernd aufeinander treffen, die folgenden Wellen aber müssen ihrer **verschiedenen** Längen wegen auseinander fallen. Der Gesammteindruck der unregelmäfsigen Wellen würde demnach keine so starken Schwankungen der Intensitäten, wie sie oben für die Töne zu [illegible] angenommen wurden, aufweisen können: er würde weniger von [illegible] abweichen und etwa die Grenzwerthe [illegible] zeigen. Für solchen Unterschied in der Interferenzwirkung sprechen mancherlei Erfahrungen. Von einem Gespräch in weiterer Entfernung hört man, wenn man sich nähert, zuerst die Vokale, dann erst nach und nach die *Konsonanten* der Silben. Die
kann man bekanntlich aus Tönen zusammensetzen: zuglei

ihnen Geräusche beigemischt, wodurch sie noch beim Flüstern erkennbar bleiben. Aus dem Unterschiede der Intensitätswirkungen der Geräusche und der Töne einerseits, der Schnelligkeit des Vortrags (§ 33) andererseits begründet sich der alt überlieferte Brauch, dafs die Abmessungen der Zuschauerräume am kleinsten gewählt werden müssen für das rasch gesprochene Lustspiel, und dafs sie gesteigert werden dürfen etwa in dieser Reihenfolge: Schauspiel oder Operette, Drama oder Spieloper, endlich grofse Oper.

Man könnte nun sich auch eine Vorstellung verschaffen von den Gesammtschallwirkungen für einen Punkt in einem Raum, wenn man den mindernden Einflufs der Interferenzen aufser Rechnung setzt. Der Zuhörer in *d* (§ 42) hat den Intensitätseindruck 5,2 der direkten Schallwelle; bei einem Konzerte würde die Summe aller ungeminderten Tonwellen sich ergeben: $= 5{,}2 \cdot 5/3 = 8{,}66$. Da in dieser Zahl enthalten wären: der direkte Ton, die sechs Reflexe erster Ordnung von den Hauptflächen des Raumes, sämmtliche Reflexe höherer Ordnungen und die Wirkungen der Resonanz, so kann in der Gröfse derselben $= 8{,}66$ des direkten Tons durchaus nichts Unwahrscheinliches gefunden werden. Für die Vierordtsche Messung würde sich eine Gesammtschallwirkung ergeben: $4{,}6 \cdot \frac{7}{4} = 8{,}05$, also etwas weniger als bei der vorherbehandelten Gesammttonwirkung. Dies würde dem oben hervorgehobenen, aus der Erfahrung bekannten Unterschiede beider Wirkungen etwa entsprechen.

In § 26 ist der Reflexionseffekt einer glatten geputzten Wand für alle späteren Entwickelungen, um die Wirkungen vorsichtig und lieber etwas zu gering zu veranschlagen, auf 80% angenommen worden. Die Messungen hatten 83—87, im Durchschnitt 85% ergeben. Bei dem Vierordtschen Versuche zeigte die Messung 4,6 des direkten Schalls, also 10% mehr als die Berechnung mit 80% Reflexionseffekt $= 4{,}11$ nachwies. Da alle anderen Faktoren zweifellos sind, liegt es nahe, die Differenz mit in der zu geringen Bewerthung des Reflexions-

effekts zu suchen. Derselbe würde also genauer der Messung entsprechend mit 85% zu beziffern sein. Die Summe aus den Wirkungen des direkten Schalls und der Reflexe erster Ordnung könnte dann dem Baumeister einen sehr erwünschten Anhalt für die an irgend einem Orte eines Saales zu erwartende Gesammtintensität des Schalls geben.

Die auf diese Weise für eine ganze Reihe von Punkten in einem Raum berechneten Schallstärken würden, verglichen mit der an denselben Punkten mittels Schallmesser wirklich festgestellten Stärken, unsere Kenntnifs der Schallverbreitung im geschlossenen Raume ganz wesentlich zu fördern geeignet sein.

§ 45.

**Mehrfacher Nutzen der Ueberhöhung der Zuschauerreihen. Die Fabel von den akustisch günstigen Verhältnifszahlen für Länge, Breite und Höhe eines Saales.**

Die Schallvertheilung, wie sie bisher im Hinblick auf Grundrifs und Längsschnitt, Fig. 13 und 14, entwickelt worden ist, giebt noch gegründeten Anlafs zu einigen allgemeinen Bemerkungen. Der Erfolg für den Punkt *d* hängt sehr erheblich von seiner hohen, der Decke nahen Lage ab, weil 1) hierdurch die Reflexe der Decke kräftiger wirken; 2) durch die mehr und mehr wachsende Ueberhöhung der Sitze die Reflexe aus den Zuschauerreihen sich um so besser und effektvoller gestalten können; 3) weil auch die Resonanz des Podiums mit dem gröfseren Elevationswinkel sich ebenfalls in ihrer Kraft vergröfsert. Die Resonanz wird am Schlufs noch ausführlich und allgemein behandelt werden. Für Räume von 50 m Länge wird die Ueberhöhung der Sitzreihen aus obigen Gründen und auch des besseren Sehens wegen nicht unterlassen werden dürfen — es sei denn, dafs solche Säle nur zu Tanz und Lustbarkeiten, aber nicht zu Vorträgen benutzt würden. Dagegen kann man sehr wohl das Zugeständnifs machen, die ersten 30 m der Länge horizontal zu legen und dann erst
Estrade von 3,5 m Höhe zu beginnen, auch auf 40 m E
eventuell einen breiteren Quergang anzuordnen. Der I

der Estrade wird aber von der angegebenen steigenden Linie nicht wesentlich abweichen dürfen. Der eben gelegte Theil bis 30 m Entfernung findet für die verlorenen Vortheile der Ueberhöhung Ersatz an den Reflexen der Estradenwand, die schicklich gleich zu Ausgängen benutzt werden kann. — Ohne Weiteres ist einleuchtend, dafs die Wirkung der Längswände durch Verringerung oder Vergröfserung der Saalbreite, die der Decke durch Tieferlegen oder Höherlegen erhöht oder ermäfsigt werden kann. Der Baumeister mufs sich durch Konstruktion der oben erwähnten Kurven hierüber Rechenschaft geben und so den nothwendigen Ausgleich zwischen akustischen, ästhetischen und den anderweiten praktischen Anforderungen herzustellen wissen. Die Rücksichten auf die Schallentwickelung nach den entferntesten Plätzen verlangen bei zunehmender Länge eine entsprechende Minderung der Breite und Höhe. Im Tivolisaal in Berlin (78,77 m lang, 15,69 m breit, 13,81 m hoch) kann ein Redner ohne wesentliche Anstrengung sich bis zur Schlufswand hin verständlich machen. Solche Verhältnisse wird man aber nicht gerade schön finden. Im Gegentheil verlangt das künstlerische Empfinden für die wachsende Länge eine entsprechend wachsende Breite und Höhe. Aesthetik und Akustik machen also gerade entgegengesetzte Ansprüche. Man kann indefs, da das Publikum den Vortragenden nicht allein hören, sondern auch sehen und sein Mienen- und Geberdenspiel verfolgen will, die Längenausdehnung überhaupt nicht übertreiben, und so werden Breite und Höhe immer noch in zulässigen Verhältnissen bleiben dürfen. Diese widersprechenden Anforderungen haben zu allerlei Verwechselungen geführt. Es giebt Fachgenossen, die immer noch nach einem geheimnifsvollen Zahlenverhältnifs zwischen den drei Hauptabmessungen eines Saales auf der Suche sind, nach einem Verhältnifs, welches das unfehlbare Rezept für die guten Klangerfolge bilden soll. Die Schwingungszahlen der Akkorde schweben ihnen dabei vor! Wer sich klar gemacht hat, dafs für jeden Platz eines Zuschauerraums das Zusammenwirken der Reflexe mit dem direkten Schall mafsgebend ist, dafs die

Stärke der Reflexe vorzugsweise von den vieltausendfachen verschiedenen Wegen derselben und nur so weit, wie oben ausgeführt ist, von den Hauptabmessungen des Raums abhängen, für den versinkt der phantastische Spuk akustischer Raumproportionen in dasselbe unrettbare Nichts, wie die Klanggefäfse, deren Resonanz die Schallwirkung in den antiken Theatern vergröfsert haben soll.

§ 46.

Resonanz: Erdboden. Fufsboden. Eigenschall resonirender Körper. Resonanz der Bautheile.

Unter Schall versteht man gewöhnlich die auf die Luft übertragenen Schwingungen eines Körpers. Auf die mit diesem Körper irgendwie zusammenhängenden festen Körper gehen die Schwingungen aber ebenfalls über. Solch ein Mitschwingen wird Resonanz genannt. Der Erdboden im Freien, in Gebäuden der Fufsboden sind Resonatoren, deren grofse Betheiligung an der Schallverbreitung meist übersehen wird. Die Indianer hören am Boden die Schritte und Hufschläge auf weite Entfernungen. Die Fufsböden geben die Schallschwingungen an die Mauern und so an die Geschosse unserer Miethshäuser ab zur geringen Freude der Einwohner, die beispielsweise den Mitgenufs von Klavierübungen gern entbehren würden. Resonanz in engerem Sinne nennt man bei allen Saiteninstrumenten das Mitschwingen der Resonanzdecken und Resonanzböden, ohne dessen Unterstützung der Klang der Saiten schwach und dumpf bleiben würde. Prof. Stokes hat berechnet, dafs der Schall einer Saite 40 000 mal schwächer ist, als der Schall einer statt der Saite schwingenden Ebene. (Rayleigh S. 355.) Die Kraft der Schwingung und der damit gleichzeitig auf die Befestigungspunkte ausgeübte taktmäfsige Zug der Saite setzt den Resonanzboden in dieselben Schwingungen. Die Uebertragung durch die Luft ist hierbei von untergeordneter Bedeutung. Ebenso verstärkt sich der Klang einer angeschlagenen Stimmgabel auffallend, sobald man ihren Stil auf eine dünne Bretttafel setzt. Der Resonanzboden ohne die Saite, die Brett-

tafel ohne die Gabel haben beide ihren Eigenschall; sie ordnen denselben aber den Schwingungen der Saiten bezw. den Schwingungen der Stimmgabeln unter. Die Körper der Violinen, Guitarren, Zithern schliefsen einen Luftraum ein mit einem Eigenklang, der sich allen Tönen anzuschmiegen im Stande sein mufs. Er allein giebt den Instrumenten den Reiz ihrer Klangfarbe, die Fülle ihrer Kraft und damit ihren Werth. Dieser Eigenklang ist mit Schallwellen, jener Eigenschall mit Klangwellen mehr oder minder gemischt. Während solche Resonanzflächen universell tonempfindlich sind, also unter allen Umständen jeden Ton verstärken, gerathen Saiten, Helmholtz-sche Resonatoren und ähnliche Hohlkörper nur dann in Mit-schwingung, wenn ihr eigener oder ein sehr nahe verwandter Ton erklingt. Bei Saiteninstrumenten ist es hier wieder der Resonanzboden, dessen grofse Fläche die Wellenbewegung aufnimmt und auf die Saite, deren winziger Querschnitt dazu viel weniger geeignet ist, überträgt. Da ohne Elastizität Schwingungen nicht stattfinden können, da alle Körper und zwar die bei Bauten verwendeten besonders elastisch sind, sind diese Körper auch sämmtlich resonant. Wenn im Erfurter Dom bei hohen Kirchenfesten die „grofse Susanne" geläutet wird, kann man an jedem Pfeiler des Schiffs die Vibrationen mit der Hand fühlen.

Zu den Reflexwirkungen kommt also noch die Resonanz aller Flächen, besonders aber die des Podiums in Theatern oder Konzertsälen, die der Rednertribüne in Sitzungsräumen u. s. w.

## § 47.

### Alterthum. Podium zu Pella. Klanggefäfse des Vitruv.

Die Resonanz war bereits den ältesten Völkern: Aegyptern, Assyrern u. s. w. bekannt. Auf ihren Denkmälern finden sich die verschiedenartigsten Saiteninstrumente dargestellt mit ähnlichen Resonanzvorkehrungen, wie sie noch heute üblich sind. Es lag nahe, diese Kenntnifs für die Theaterscene zu verwerthen. Plutarch erzählt, dafs Alexander der Grofse bei dem

des Theaters zu Pella ein erznes Bühnenpodium ver-
t habe. Der Architekt aber sei mit seiner Weigerung, dies
uführen, durchgedrungen, weil ohne hölzernes Podium
Stimmen der Schauspieler an Kraft verloren hätten".
In seinem Buche de architectura (liber V, cap. V, de theatri
;) bei der Geschichte von den Klanggefäfsen in den
:hischen Theatern, sagt Vitruv, um den Einwand abzu-
eiden, dafs derartige Verwendungen von Klanggefäfsen in
römischen Theatern sich doch garnicht vorfänden: „Hierin
würde man irren, da alle öffentlichen Theater (in Rom)
Holz beständen und vielfach Täfelungen hätten, welche
wendig (ausreichend) klingen müfsten". (Sed erravit in eo,
l omnia publica lignea theatra tabulationes habent
plures, quas necesse est sonare.) Bald darauf fügt er
ı: „Sind die Theater aber aus massiven Stoffen errichtet,
. aus Cementbau, Stein, Marmor, welche nicht klingen
ıen, so sei aus diesem Grunde die Verwendung der Klang-
fse zu erklären; wenn aber gefragt würde, in welchem
ıter dieselbe ausgeführt seien, so könne man in Rom frei-
nichts aufweisen; dagegen in den Provinzen Italiens und
len meisten griechischen Staaten. Ein Zeuge dafür sei
ı L. Mummius, der aus dem zerstörten Theater in Korinth
Erzgefäfse nach Rom gebracht und dem Tempel der Luna
seinen Beuteantheil verehrt hätte". Es ist nicht unwahr-
inlich, dafs man in Griechenland auf diese Idee verfallen
und auch vielleicht Versuche damit gemacht hat. Bei der
klichen Mischung von künstlerischer Begabung und prak-
ıem Blick, der dieses Volk auszeichnete, hat man sich
.fellos sehr bald von der Unfruchtbarkeit jenes Gedankens
·zeugen müssen. Die Klanggefäfse würden doch nur den
:ck gehabt haben können, die menschliche Stimme zu
:rstützen. Man überzeuge sich einmal, mit welcher Kraft
in ein Glas oder in einen gläsernen Pokal den Eigenton
er Gefäfse hineinsingen mufs, um sie zu einem deutlichen
önen zu bringen! Von der Bühne her auf 25 m Entfernung
noch weiter ist die menschliche Stimme garnicht im Stande,

größsere Klanggefäfse aus Erz oder Thon in derartige Mitschwingung zu versetzen, dafs auch nur die dicht daran sitzenden Zuschauer davon etwas vernehmen könnten. Ganz wie ein heutiger Zeitungsreporter mochte sich der Compilator Vitruv diese seltsame Geschichte, welche ja immerhin noch besser begründet war, als die Tischrückerei vor nun 40 Jahren, auf keinen Fall entgehen lassen. Er sucht sie bestmöglich zu bewahrheiten. Der letzte Trumpf, den er ausspielt, die pomphafte Aufstellung als Opfergabe im Tempel der Luna, scheint im Gegentheil ein Beweis dafür zu sein, dafs diese Gefäfse keine Klangvasen von einfacher mathematischer Form, sondern schöne Schmuckgefäfse gewesen sind, die auch im Theater zu Korinth keinen anderen Zweck gehabt haben werden.

In hohem Mafse bemerkenswerth bleibt bei alledem, dass man bereits in antiker Zeit über die Resonanz des Holzes richtige Erfahrungen hatte.

## § 48.

### Streichinstrumente. Mittelalter. Amati. Stradivari. Guiseppe Garneri (del Gesù). Vorzüglichkeit neuer Geigen.

Im Mittelalter zeigen sich Bestrebungen, die Resonanz der Saiteninstrumente zu verbessern. Dies hing zusammen mit dem Auftauchen der Streichinstrumente. Ob diese auf den britischen Inseln, ob im Orient ihren Ursprung haben, wird wohl strittig bleiben. So erfinderisch aber auch dieses Zeitalter in der Herstellung malerischer und eigenthümlicher Formen für eine überraschend grosse Zahl von Instrumenten war, die theils mit der Hand, theils mit dem Bogen, theils auf beide Weisen gespielt wurden: der wesentlichste Fortschritt ist erst im Ausgange des Mittelalters bei der Gestaltung des Violinkörpers zu verzeichnen. Der Erste hierin war 1510 zu Bologna Gaspard Duiffobruggar (augenscheinlich ein Deutsch-Tyroler Kasper Tiefenprugger), dann 1520 zu Cremona Andrea Amati und dessen Nachfolger, bis endlich Antonio Stradivari 1644—1737 und Giuseppe Garneri (del Gesù) 1683—1745 die Formen der Geige derart feststellten, dafs eine weitere Verbesserung in Kraft und Schönheit des

Tones unerreichbar erscheint. Die unscheinbar aussehenden Instrumente obiger Meister werden mit Summen bezahlt, welche ein Vermögen ausmachen. Zum Troste der Geigenspieler, welchen dieser Luxus versagt ist, fertigt man indessen bis auf die heutige Zeit in genauer Nachbildung gute Violinen, deren Klangfülle jenen Cremonesern kaum etwas nachgiebt. Merkwürdigerweise sollen dazu aber italienisches Tannenholz (mit feiner gleichmäſsiger Faserung) und italienische Saiten gehören. Es scheint, daſs die Natur sich nicht Genüge gethan zu haben glaubte, als sie diese Halbinsel mit einer Fülle schönen Stimmmaterials in allen Klassen der Bevölkerung ausstattete; sie lieſs es auch an keinem Stoff zur Herstellung vorzüglicher Instrumente fehlen. Den Beweis, daſs moderne Geigen jenen berühmten Mustern nicht nachzustehen brauchen, hat Anfangs dieses Jahrhunderts ein Wettspielen in Paris geliefert. Eine Versammlung musikalischer Autoritäten, welche das Spiel wohl hören, aber nicht beobachten konnten, war nicht im Stande, einen wesentlichen Unterschied zu finden, ja neigte sich eigentlich etwas den neuen Instrumenten als den klangvolleren zu. Den alten Italienern bleibt trotz dessen der unsterbliche Ruhm der Priorität.

### § 49.

**Henry's Versuche. Der Sinus des Elevationswinkels als Maſs der Verstärkung bei einer resonirenden Fläche.**

Die neuere Zeit hat die Resonanzbedingungen zu ergründen versucht. Hängt man eine Stimmgabel frei an einem Faden in der Luft auf und versetzt sie in Schwingungen, so dauern dieselben mit schwachem Klange ziemlich lange. Bei Henry's Versuchen (Haege's Mittheilung in der Zeitschrift für Bauwesen 1859. S. 585) währten die Schwingungen in der Luft 252 Sekunden. Setzte man die Gabel auf eine dünne Marmorplatte, so war die Dauer 115 Sekunden; auf einer Ziegelmauer 88 Sekunden, einer geputzten Lattenwand 18 Sekunden, einer Holztafel 10 Sekunden. Mit der kürze[illegible] Schwingungsdauer fand auch die gröſste Zunahme de[illegible] statt. Die schwach hörbaren Schwingungen der [illegible]

kunden in freier Luft setzten ihre Kraft in die Mitschwingungen der laut tönenden Holztafel um und währten dann nur 10 Sekunden = $^{1}/_{25}$ obiger Dauer. Die Tonverstärkung dabei ist sehr bedeutend. Die Holztafel zeigt noch eine weitere wichtige Erscheinung. Dreht man sie mit der darauf stehenden tönenden Stimmgabel um eine ihrer Seiten, so findet man, dafs der Ton sehr schwach wird, wenn das Ohr in die Ebene der Tafel fällt; dafs er rasch wächst mit dem Elevationswinkel des Ohrs über der Tafel bis zu etwa 30—40 Grad. Weniger rasch nimmt die Verstärkung zu bis zu 50—60 Grad und noch langsamer bis 90 Grad. Die Tonstärke wächst mit dem Sinus des Elevationswinkels. Das Verschwinden des Tons in der Verlängerung der Ebene der Tafel erklärt sich aus der Interferenz der Tonwellen, welche sich an den beiden Oberflächen der Tafel bei deren Schwingungen immer in entgegengesetztem Sinne bilden. Einer positiven Schwingung der Vorderseite entspricht eine negative der Rückseite. Für jeden Punkt in der Verlängerung der Tafelebene kommen die beiden gleich starken und gleich langen Tonwellen in demselben Augenblick an und heben sich auf. Nur die Schwingungen der Stimmgabel selbst bleiben mit schwachem Tone hörbar.

## § 50.

### Geigenkasten.

Eine Bestätigung hierfür dürfte der Geigenkörper zeigen. In Fig. 17 ist *a* der Kopf mit dem Wirbelkasten, *b* der Hals, *c* die Resonanzdecke, *d* der Steg, *e* der Saitenhalter, *i* der Boden, welcher durch die rundumlaufende Zarge *h* mit der Decke verbunden ist. Die Saiten sind vom Wirbelkasten über den Sattel *l*, mit welchem der Hals beginnt, und dem Stege *d* nach dem Saitenhalter oder der Fessel *e* gespannt. Wenn Resonanzdecke und Boden, wie beispielsweise bei der Guitarre, ganz eben wären, so würden in den Verlängerungen dieser Ebenen die Geigentöne schwächer klingen, als in den Orten, welche einen gröfseren Elevationswinkel zu diesen Ebenen haben. Die schmale Zarge *h* konnte diesen Verlust nach den

ıktischen Erfahrungen, wie es scheint, nicht ausgleichen. ın kam daher auf ganz empirischem Wege zu der Verllkommnung, die Resonanzdecke etwas stärker, den ɔden etwas schwächer zu wölben d so die Resonanzwellen auch auf ıe Ebenen zu vertheilen. Am Stege : inder Nähe der Diskantsaite ein ıchtes dünnes Stäbchen, der Stimmock, zwischen Decke und Boden ngeklemmt, welches die Vibrationen, e der Steg von den Saiten auf die ecke überträgt, von dort nunmehr ıf den Boden leitet, und zugleich der ecke an dem am meisten belasteten rte eine Stütze giebt. Die runden usschnitte *g* am Geigenkörper sind ıch erst eine Errungenschaft des ıäteren Mittelalters. Man kam allählich dahinter, dafs die Kraft des ɔnes wuchs, je senkrechter zur Decke e Saiten vom Bogen gestrichen ɜrden konnten, und um dies mögːhst zu erreichen, schnitt man die ırge zu beiden Seiten aus. Die testen Streichinstrumente haben diese usschnitte noch nicht. — Der Ton ːr Saite rührt fast ganz aus den ıerschwingungen, nur wenig aus

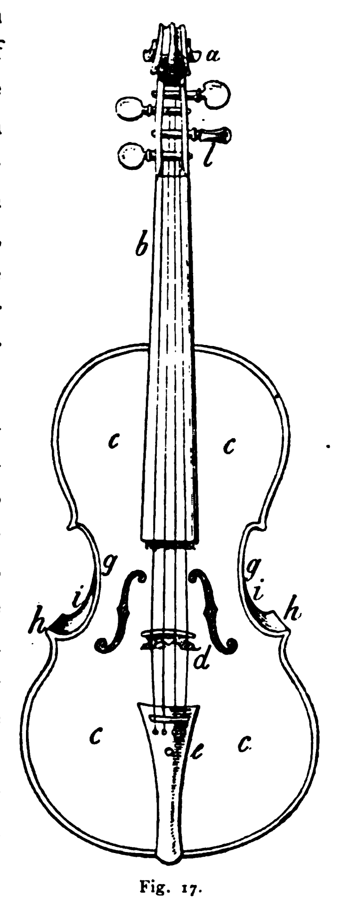


Fig. 17.

ɱ Längsschwingungen her. Von dem Vorhandensein der ːzteren kann man sich überzeugen, wenn man mit einem ück Zeug, das mit Kolophonium bestreut ist, die Saite ihrer Längsrichtung reibt. Aus der Mischung von Querd Längsschwingungen kann der Spieler den Ton nun zummensetzen. Ein Bogenstrich senkrecht zur Saite ruft vorgsweise Querschwingungen hervor und nur so viel Längshwingungen, als durch die Dehnungen der Saite

sind. Sollen deren mehr auftreten, so wird der Bogen schräger geführt u. s. w. Hierzu kommt der Einfluſs des Punktes, wo der Bogen ansetzt und die Saite dementsprechend in schwingende Unterabtheilungen mit deren Obertönen zerlegt. Endlich aber auch wird durch die Art des Bogenstrichs der ganze Violinenkörper in schwingende Flächenstücke getheilt, deren Grenzlinien (Knotenlinien) wechseln und auf die Veränderung der Klangfarbe einwirken. Auf solche Weise kann ein begabter Geiger diesem Instrumente Töne entlocken, welche jede Schattirung menschlichen Gefühls auszudrücken im Stande sind. Die Resonanzdecke wie der Boden der Geige ist nur wenige Millimeter stark; deshalb überträgt die Kraft der Saitenvibrationen sich durch den Steg so gut auf diese dünnen elastischen Holzflächen.

Bei den Blasinstrumenten erzeugen die in ihnen schwingenden Luftsäulen nicht allein den Ton; das Blech bzw. das Holz der Körper schwingt kräftig mit, unterstützt die Kraft des Klangs und giebt ihm einen erheblichen Theil der Klangfarbe.

## § 51.

### Resonanz der Straſsenfläche; der Bühnenpodien. Neigung des Podiums.

Weniger auffällig wie bei den Instrumenten, aber doch merklich, tritt die Resonanz in vielen anderen Fällen auf. Spricht Einer vom Trottoir der Straſse zu einem Andern auf dem Balkon des zweiten Stocks, so braucht, um sich verständlich zu machen, der Erstere die Stimme nicht besonders anzustrengen, während der Letztere fast schreien muſs. Auſser der Resonanz des Trottoirs kommt hierbei allerdings noch der Umstand in Rechnung, daſs der Ton sich aus der unteren dichteren Luftschicht besser nach der oberen dünneren fortpflanzt, wie umgekehrt. Ebenso hört man auf den höheren Gallerien der Theater trotz der gröſseren Entfernung gewöhnlich deutlicher, als im ersten Range und im letzten Drtttheil des Parkets. Noch überraschender, wenn auch nach Obigem

und Früherem leicht erklärlich, ist die Genauigkeit, mit der auf dem Schnürboden das leiseste Wort verständlich ist, welches auf dem Podium hinter den Kulissen gesprochen wird. Der Maschinist weifs immer unheimlich viel.

Je mehr der Fufsboden des Podiums nach den Zuschauern geneigt ist, je gröfser also für letztere der Elevationswinkel über der Podiumfläche wird, um so kräftiger wird die Resonanz wirken. Daher ist die wachsende Ueberhöhung der Sitzreihen nicht nur für den besseren Effekt des direkten Tons und seiner Reflexe, sondern auch für die Resonanz des Podiums von Wichtigkeit. Es ist früher bereits erwähnt, dafs die kräftigende Wirkung der Podiumbretter schon vor mehr als zweitausend Jahren von den Griechen voll gewürdigt wurde.

### § 52.

**Rednertribünen. Kanzeln. Dünner Belag. Nische der Trocadero-Rotunde.**

In Versammlungssälen pflegt man auf die Ausbildung der Rednertribüne wohl in architektonischer, selten aber in akustischer Beziehung Sorgfalt zu verwenden. Sehr mit Unrecht, wie mir scheint. Wer spricht nicht alles in solchen Räumen? Häufig Herren mit schwacher Stimme und mangelhafter Aussprache, die hinterher höchst bestürzt sind, dafs nur ein Dritttheil der Anwesenden sie nothdürftig verstanden hat. Grofse schwere Redepulte von Eichenholz mit geschlossenem Unterbau sind zu verwerfen und im Gegentheil ein leichtes Gestell mit durchbrochenen Vorderflächen anzuordnen, damit Pult wie Podium vibriren und die so erzeugten verstärkenden Schwingungen ungehindert in den Raum übergehen können. Die möglichst nahe Rückwand ist zu täfeln, kann auch eine Nische in flachem Segmentbogen oder Vieleck erhalten. Aehnliche Erwägungen sind für Kanzeln mafsgebend. In Kirchen ist die Höhe der Gewölbe oder der Decke durch den von dort sich bildenden, für einzelne Orte leicht konzentrirten Nachhall bedenklich. Kräftige, reich profilirte Gewölberippen und Schlufssteine, stark reliefirte Rahmungen und Gliederungen

an den Wänden, rauhe Felder sind zu empfehlen. Günstig wirkt immer ein hinreichend grofser Schalldeckel, der mit der ebenfalls hölzernen Kanzel durch eine breite Rückwand zu verbinden ist. Der passende Ort dafür ist die Ecke der Schlufswand mit der Apsis, so dafs der Prediger möglichst in die Längsachse der Kirche sprechen kann. Steinkanzeln sind vom Mittelalter bis ins vergangene Jahrhundert mit Vorliebe und vielfach künstlerisch vollendet ausgeführt worden. Für gröfsere Kirchen sind Holzkanzeln vorzuziehen. Die ebene Lage des Fufsbodens macht den erhöhten, für die Schallverbreitung nicht günstigen Standpunkt des Predigers nothwendig. Die Zuhörer auf dem Chor hören besser als die zur ebenen Erde. Diesen wird man durch Holzfufsboden im Gestühl, Täfelungen an den Wänden und Pfeilern zu Hilfe kommen müssen. Pfeilerbündel mit runden Profilen wirken günstig. Breite viereckige glatte Pfeiler können Nachhall, selbst Widerhall verursachen. Dasselbe ist von den der Kanzel gegenüberliegenden Mauerflächen zu befürchten, wenn sie nicht gegliedert und gerauht werden. Ein erfahrener Kanzelredner findet auch in einer ihm fremden Kirche schon nach kurzem Vortrage heraus, wie rasch, wie laut und in welcher Richtung er zu sprechen hat, um seine Stimme am besten zur Geltung zu bringen.

Es ist § 51 darauf aufmerksam gemacht, dafs die starke Resonanz der Geige mittels der dünnen, elastischen, leicht vibrirenden Flächen des Geigenkörpers stattfindet. Kaum zweifelhaft kann es hiernach sein, dafs bei Kanzeln, Rednertribünen eine dünne Täfelung aller Flächen, besonders der Podien, ebenfalls vortheilhaft sein würde. Auch bei Bühnenpodien wäre ein schwacher Belag von ausgewähltem Tannenholz mit näher gerückten Unterstützungen für die sogenannte 0te und 1te Kulissengasse sehr zu empfehlen. Hier ist der gewöhnliche Stand des Schauspielers oder Sängers, den er nur ausnahmsweise, wenn es sich nicht umgehen läfst, aufgiebt. Die Schablone, auch in der ersten Kulissengasse eine breite Versenkung anzulegen, wäre dann allerdings zu ver-

lassen, da der Versenkungsschieber aus starken Brettern be stehen mufs. Dafür ist an etwa erforderlicher Stelle eine Einzelversenkung anzuordnen. Massenversenkungen im äufsersten Vordergrunde, die dem Publikum das viereckige, nüchterne Loch im Belage zeigen und ihm alle Illusion rauben, sind überhaupt eine schwer begreifliche Geschmacklosigkeit.

Bei der Errichtung der Trocadero-Rotunde in Paris haben die Architekten Davioud und Bourdais 1878 die Deckenwölbung der grofsen bühnenartigen Orchesternische in hundert „Compartiments“ zerlegt, deren jedes nach einem entsprechenden Theile der entfernteren Hälfte des Raums den Schall zu reflektiren bestimmt war. Um sich vorher von der Wirksamkeit zu überzeugen, liefsen sie ein Modell fertigen, bei dem jene in Spiegelflächen ausgeführte Wölbung denn auch wirklich die Strahlen eines im Orchestermittelpunkte befindlichen Lichtes in der beabsichtigten Weise vertheilt haben soll.

Je näher die Rückwand dem Vortragenden ist, um so sorgfältiger ist sie mit dem Podium zu verbinden und in leicht vibrirendem Tafelwerk auszubilden. Die Resonanz des Podiums wirkt wegen der Lage desselben nur für die höher liegenden Logen; die Resonanz der senkrecht stehenden Rückwand änfsert ihr Maximum für den ganzen Raum. Die Herrichtung dieser Wand ist in Konzertsälen, Versammlungsräumen unschwer auszuführen. Auf Theaterbühnen ist sie leider nicht möglich. Aus diesem Grunde habe ich in der Abhandlung: „Szene der Alten und Bühne der Neuzeit“ eine breite, aber flache Bühne vorgeschlagen, um durch die nicht weit entfernte Schlufsdekoration wenigstens einen Theil der Wirkung zu retten, welche bisher bei einer schmalen Szene in die dann nöthige Tiefe verloren wurde.

## § 53.

### Fufsboden, Wände und Decke.

Auch Fufsboden, Wände und Decke eines Raumes bilden gewissermafsen einen erweiterten Resonanzboden. Wenn die Flächen so tonleitend und resonant wären, wie der Körper

eines Saiteninstruments, so würde ein Uebermafs von Mitklingen entstehen. Die Resonanz ist jedoch wesentlich schwächer. Immerhin ist sie bei einem aus Fachwerk und Holzgetäfel bestehenden Raum nach alter Erfahrung (Vitruv § 47) sehr merkbar. Der Vorgang ist durch eine Erweiterung der bisherigen Betrachtungen sehr erklärlich. Je unmittelbarer der Zusammenhang zwischen Podium, Fufsboden, Wänden und Decke ist, um so kräftiger werden sich die Klangschwingungen von dem tönenden Körper über alle diese Flächen verbreiten, und da die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern eine viel gröfsere — in Holz zwölf- bis achtzehnfach — als in der Luft ist, so findet die Tonwelle bei ihrer Fortpflanzung durch die Luft, sobald sie solche Fläche erreicht, dieselbe bereits schwingend vor und hat nur nöthig, die Amplitude dieser Schwingung zu erweitern oder zu verringern. Es entstehen hierbei Interferenzen zwischen Luft- und Wandschwingungen, deren Häufungen die Häufungen im Ohre des Zuhörers verschärfen müssen.

## § 54.

### Endergebnifs. Oberammergau.

Alle diese unzähligen Resonanz- und Reflexschwingungen vereinigen ganz ähnlich, wie die einzeln unhörbaren Tropfen zum Rauschen des Regens, sich zu einer mit den Entfernungen verhältnifsmäfsig immer mehr wachsenden und die direkte Schallwirkung dann weit übertreffenden Gesammtintensität. Als Endergebnifs dieser Abhandlung darf man hiernach die Gewifsheit betrachten, dafs ein Versammlungsraum selbst für mehr als viertausend Sitzplätze, wenn er zweckmäfsig gestaltet und durchgebildet ist, von der menschlichen Stimme in befriedigender Weise beherrscht werden kann. Das habe ich schon vor Jahren öffentlich ausgesprochen, bin dabei aber mehrfach auf Widerspruch gestofsen. Seitdem sind mancherlei entscheidende Erfahrungen gemacht und hier zusammengefafst worden. Den Schallmessungen gegenüber können die Zweifel nicht mehr aufrecht erhalten bleiben. In Oberammergau hat inzwischen

die Richtigkeit des Grundgedankens eine glänzende Bestätigung gefunden. Das Theater faſst viertausend Sitze, deren äuſserste Reihen 43 m von der Bühne, also etwa 50 m vom Darsteller entfernt sind. Und dennoch wird bis zum letzten Platz der Text des Passionsspiels, den Dilettanten sprechen, deutlich verstanden! Sehr erklärlich! Die Bühne hat bei groſser Breite eine Tiefe von nur 8—11 m. Der mächtige Zuschauerraum steigt in einer Ebene mit dem Verhältniſs von ungefähr 1:5 an, und ist ein leichter, nur in seiner entfernteren Hälfte überdeckter Holzbau mit Brettbekleidung. Ein noch vielfach verbesserungsfähiges Provisorium, zeigt das Theater trotzdem bereits einen befriedigenden Erfolg.

## § 55.

### Erläuterung einiger praktischer Fälle.

In Fig. 18 ist der Grundriſs eines Saales von 50 m Länge, 30 m Breite dargestellt, der eine Höhe von 17 m haben mag.

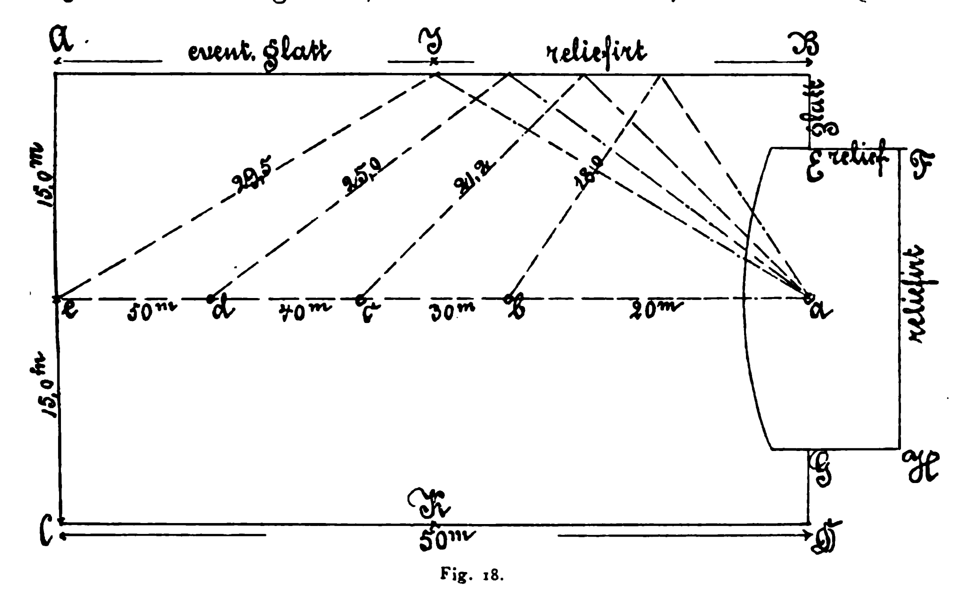



Fig. 18.

*EFGH* ist die Nische für ein Podium, welches zu Schaustellungen, für Musik u. s. w. dienen soll. Der Standpunkt des Vortragenden, des Sängers u. s. w. ist in *a*. Abgesehen von

der für einen solchen Raum unerläſslichen architektonischen Theilung und Gliederung sollen die Reflektionsverhältnisse der Flächen untersucht werden. Die Rückwand *FH* der Nische ist zu reliefiren oder mit Rappputz zu versehen, da sie von *a* 6 m entfernt liegt, die Reflexe von glattem Putz mit einem Wegeunterschiede von $2 \cdot 6 = 12$ m, also viel zu sehr getrennt vom direkten Schall und daher störend in den Saal gelangen würden. Dasselbe gilt von den beiden Seitenflächen der Nische *EF* und *GH*, während die zwei Flächen *BE* und *DG* eventuell glatt bleiben könnten. Die gegenüberliegende Schluſswand muſs, wie bereits früher hervorgehoben, Relief erhalten, da sich andernfalls von dort sehr lästiger Widerhall bilden würde.

Die Reflexion der Langwände zeigt, daſs für den 20 m von *a* entfernten Punkt *b* ein Wegeunterschied von $2 \cdot 18 = 36 - 20 = 16$ m eintreten würde; für den 30 m entfernten Punkt *c* ein Unterschied von $2 \cdot 21{,}2 = 42{,}4 - 30 = 12{,}4$ m; für *d* ein solcher von $2 \cdot 25 = 50 - 40 = 10{,}0$ m; für *e* endlich von $2 \cdot 29{,}15 = 58{,}3 - 50 = 8{,}3$ m. Erst diesen letzten Wegeunterschied von 8,3 m würde man als nicht mehr sehr hinderlich oder störend ansehen können. Es folgt hieraus, daſs die vorderen Hälften *BI*, *DK* der Langwände mit einer schallzerstreuenden Oberfläche zu konstruir en sind. Ganz dieselben Erwägungen sind für die Decke des Raumes maſsgebend.

§ 56.

In Fig. 19 ist die Deckenausbildung bei Anlage von Galerien, Logen u. dergl. behandelt. Die Schallentwickelung nach derartigen, höher gelegenen Partieen ist nach alten Erfahrungen eine günstige, weil die Schallwellen aus den tieferen sich besser nach den höheren Luftschichten fortpflanzen, und weil die Resonanz des Podiums mit dem wachsenden Elevationswinkel entsprechend zunimmt. Die Ausnutzung dieser Vortheile wird leider durch die harten baupolizeilichen Bedingungen für die zugehörigen Treppenanlagen ziemlich illusorisch gemacht. Nur für sehr groſse Entfernungen würde man zu der in dem Beispiele gezeichneten Vorkehrung greifen,

die ein Herablenken der die Deckenfläche *ab* treffenden Schallwellen auf die darunter befindlichen Sitze bezweckt. Für gewöhnliche Fälle dürfte eine kräftige Reliefirung dieser Decken-

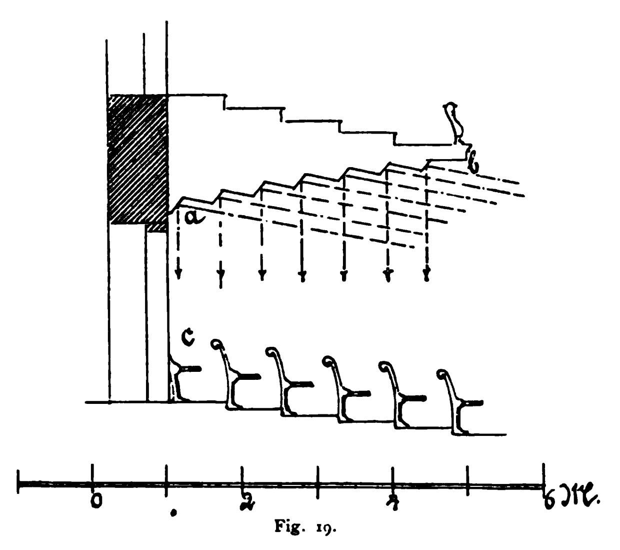


Fig. 19.

fläche ausreichen, zumal die Schlufswand *ac* die aufgefangenen Schwingungen zurückwirft.

§ 57.

Ebenso wie beim Zuhörer, wird es auch bei der Schallquelle, bei dem Vortragenden, wesentlich sein, die reflektirten Schallwellen einen möglichst g e r i n g e n Umweg machen zu lassen. In Fig. 20 soll *v* den Standpunkt des Redners bedeuten, der von der Rückwand etwa 1 m entfernt ist. Es kommt nun doch darauf an, recht viele und kräftige Reflexe nach

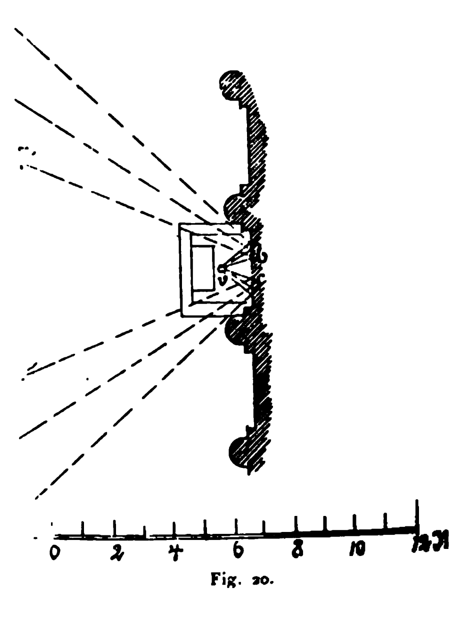


Fig. 20.

dem am meisten entfernten anderen Ende des Raumes zu lenken. Bei einer geraden glatten Rückwand geschieht dies nur durch die schmale Fläche *bc*; die Grenzen der Wellenbewegungen sind für obigen Zweck die Richtungen *ba* und *cd*. Das Mafs *bc* kann nur dadurch vergröfsert werden, dafs der Standpunkt *r* weiter von der Wand entfernt wird. Damit aber wächst die Wegedifferenz und nimmt zugleich die Wirksamkeit der Reflexe ab.

§ 58.

Es empfiehlt sich daher, die Rückwand nicht gerade zu lassen, sondern nach Fig. 18 eine flache Nische, deren Bogen $\beta\gamma$ aus dem Mittelpunkte o beschrieben ist, anzuordnen. Die Fläche $\beta\gamma$ ist mehr als dreimal breiter, als *bc* in Fig. 21; und reflektirt mit einem entsprechend gröfseren Nutzeffekt nach den entfernteren Partieen des Raumes. Es ist dies für dieselben eine ebenso wünschenswerthe Unterstützung der Schallwirkung, wie es ein Vortheil für die vordere Hälfte des Saales ist, wenn keine von der Rückwand und dann von den Langwänden dorthin gelenkte Schallwellen die bereits hinreichend starke Schallwirkung daselbst noch vergröfserten. Die Ausbildung der Nischenfläche erfordert noch eine besondere Erwägung. Stellt man diese Oberfläche in polirten Marmor her, so ist der Reflexionseffekt ein nahezu vollkommener. Will man die Wirkung, was im allgemeinen anzurathen ist, etwas weicher und runder haben, so ist eine dünne hohle Holztäfelung der Rückwand, die mit dem Podium eng verbunden ist, vorzuziehen. (§§ 51 und 52.)

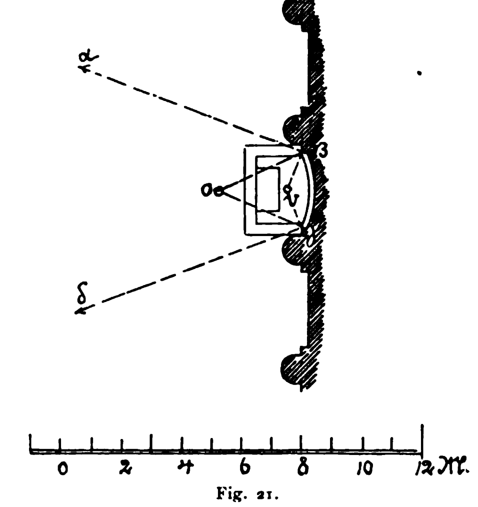


Fig. 21.

§ 59.

Um die aus repräsentativen Rücksichten übertriebene :höhung von 2—2,5 m und die damit verbundenen Nach-.eile der Kanzellage (§ 52) für die entfernteren Zuhörer ıszugleichen, mufste man eine Fläche anordnen, die den :hall dorthin reflektirte: den Schalldeckel. Man kann damit :n Fehler des zu hohen Standpunkts aber niemals völlig aus-eichen. Für protestantische Kirchen, in denen die Predigt :n Hauptheil des Gottesdienstes ausmacht, wird es sich daher npfehlen, den Ort des Predigers seitlich vom Altare und nur enig über den Kirchenfufsboden erhöht anzunehmen. Als-ınn wird ein Schalldeckel nur ausnahmsweise für sehr grofse bmessungen nöthig werden.

Eine solche Nothwendigkeit kann auch für Festhallen mit ıfsergewöhnlichen Dimensionen eintreten und soll hier noch ırz besprochen werden. Auf einem Podium von zwei Stufen eht (Fig. 19) ein Rednerpult, über welchem die reflektirende läche *bd* in solcher Neigung an-:bracht ist, dafs die Schallwellen ıch den entfernteren Theilen der alle zurückgeworfen werden. Die läche *bd* kann eine polirte Mar-orplatte, sie wird noch besser ne polirte Holzplatte sein, die ıch unten bündig aus Rahmwerk ıd Füllungen besteht, und der esonanz wegen mit Rückwand ıd Podium fest zusammenhängt. ie Marmorplatte hat allerdings nen nur minimalen Reflexions-:rlust; bei der Holzplatte ist dieser Verlust etwas gröfser, ırd aber durch die eintretenden Resonanzschwingungen mehr-ch wieder ausgeglichen. Auch die Marmorplatte resonirt; ese Schwingungen sind aber des Materials wegen lange ni kräftig wie bei Holz, weil sie nach Henry's Versuc

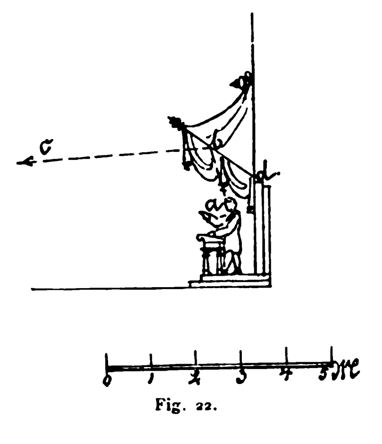


Fig. 22.

zwar von 11,5 mal längerer Dauer, dementsprechend a schwächer sind.

Bei der Resonanz wie bei der Reflexion tritt uns übe für eine günstige Schallwirkung die Bedingung entgegen: allen irgendwie zweifelhaften Fällen Theilung zu massi leicht störender Reflexe in eine möglichst grofse Zahl weni starker Schallwellen. Die Natur ist dabei unsere gütige, widerlegliche Lehrerin. Wie weit und wie schön klingt Wort, tönt der Gesang im Walde!

---

Druck von W. Pormetter in Berlin.

# Nachtrag zur Akustik des Baumeisters

von

**A. Sturmhoefel.**

## § 19.

Oberbeck und nach ihm Vierordt hatten aus ihren Unter-chungen eine Formel konstruirt (vgl. § 19 Seite 25), welche e Schallabnahme abhängig machte von einem Exponenten ε er Fallhöhe. Dieses ε wurde ermittelt aus den logarithmischen erhältnissen der verschiedenen Fallhöhen zu denen der ver-chiedenen auf eine schallende Fläche aufschlagenden Ge-ichte. Der Werth von ε schwankte zwischen 0,57 und 0,72; wurde niemals 1.

Diesen Untersuchungen war ich besonders dort gefolgt nd hatte sie als maſsgebend betrachtet, wo sie über ihren gentlichen physiologischen Hauptzweck hinaus sich mit Schall-essungen im Freien beschäftigt hatten. Im freien Felde war r Ergebniſs gewesen, daſs die Minderung der Schallstärke demselben (einfachen) Verhältnisse wie die Abstände von er Schallquelle (also nicht wie die Quadrate der Maſse dieser bstände) wachse. Das entsprach meinen eignen mit noch imitiven Hilfsmitteln angestellten Messungen, bei denen sich r Innenräume auf weitere Entfernungen auch etwa die doppelte hallstärke bei dem doppelten Abstande als für die Reiz-hwelle genügend herausgestellt hatte. Nachdem ich jedoch n sehr viel empfindlicheren und demnach zuverlässigeren llstäbchenapparat konstruirt und mich hinreichend mit dem-lben eingearbeitet hatte, muſste ich je länger je mehr inne-erden, daſs die Theorie Oberbeck-Vierordt, abgesehen v

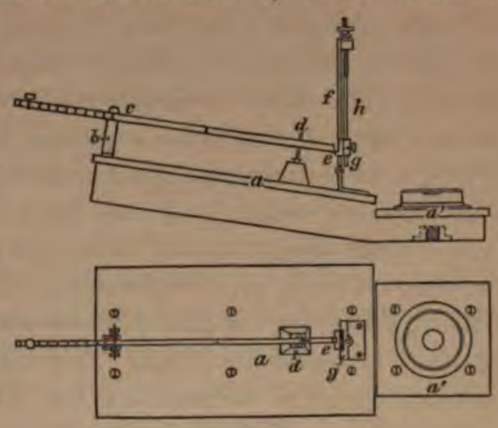
ihrer Umständlichkeit, für die Beurtheilung der Schallentwicklung in gröfseren Innenräumen — also für die Zwecke des Baumeisters — als mafsgebend nicht bestehen bleiben konnte.

Auf diesem Wege die Resultate der Messungen in Einklang zu bringen mit dem mathematisch-physikalischen Grundgesetze der Schallabnahme nach dem Quadrate der Entfernungen war unmöglich. Es war bei der Herleitung aufser Betracht gelassen der Einflufs der Reflexe, die den direkten Schall immer und in immer wechselnder Stärke begleiten, jenes ε niemals 1 werden liefsen, oder gemeinverständlicher ausgedrückt: die es unnöthig machten, für die doppelte Entfernung die vierfache Schallstärke aufzuwenden. Vierordt bestrebt sich ausdrücklich (aber vergeblich!) § 56 Seite 235 seiner „Schall- und Tonstärke" die Reflexe möglichst zu beseitigen. Ferner scheinen nicht beachtet worden zu sein die aus den Interferenzen resultirenden erheblichen Schwankungen der Schallstärken, die es, wie ich wiederholt beobachtet habe, mit sich brachten, dafs bei derselben Fallhöhe und derselben Belastung des Fallstäbchens der Schall auf 1 m Entfernung einmal scharf und klar und gleich darauf matt und leise klang.

## § 22.

Bei dem § 22 beschriebenen Instrumente kamen mir bei längerem Gebrauche Bedenken wegen der sicher zu erwartenden Interferenzen, sobald das eine Stäbchen, wenn auch für menschliche Beobachtung kaum merklich, früher fällt als das andere. Dies konnte beseitigt werden durch Verwendung nur Eines Stäbchens, dessen Gewicht sich verändern liefs. Dann blieb auch, was sehr wesentlich ist, die Schallfarbe des Instruments immer genau dieselbe und nur die Stärke des Schalls konnte nicht blofs verdoppelt, sondern in jeder beliebigen Weise verändert werden. Es wurde auf der Holzplatte *a* von 150 mm Länge, 80 mm Breite und 4 mm Stärke ein Lagerbock *b* aufgeschraubt, in welchem sich zwischen 2 Körnerspitzen das Fallstäbchen von 2,5 mm/3,5 mm Querschnitt mit geringster Reibung dreht. Die Länge des Stäbchens von der Drehachse *c* bis zur

chraube *d* ist 100 mm, von dort bis zum Ende *e* 20 mm. Endkante ist durch eine feine Metallschneide gesichert, ann von beliebigen Höhen des Schiebers *g* auf den kleinen ofs über der Platte *a* fallen. Der Schie- st mit einem Nonius estattet; er gleitet lem Millimetermafs- *f* und der Spindel i entlang, bis er ler Spindel festge- ubt und dann mit- der oberen Mikro- rschraube feinge- wird. Der Ruhe-



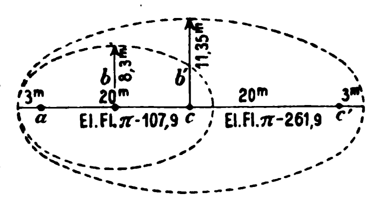

des Fallstäbchens entspricht o des Nonius auf o des Mafs-, der mit einem Klappscharnier auf der Platte *a* befestigt Der Kopf der Fallschraube wird durch Herauf- oder Herab-en hierbei so berichtigt, dafs er grade auf dem Ambofs auf- Jenseits der Drehachse hat das Fallstäbchen eine Länge 52,5 mm und ist von dort aus in Abständen von 5 mm feinen vertikalen Bohrlöchern versehen, in die der etwas sche Dorn des Gegengewichts von 1,19 Gramm Schwere , welches in 50 mm Entfernung von der Drehachse bei ontaler Lage dem Gewicht des Fallstäbchens nebst Fall-ube das Gleichgewicht hält. Steckt man das Gegengewicht 45 mm Entfernung von der Drehachse ein, so gleicht es $^9/_{10}$ allenden Schenkels ab, der dann mit $^1/_{10}$, also (mit Berück-igung des gröfseren Hebelarms) mit rot. 0,06 Gramm, einem geringen Gewicht, auf den Ambofs drückt oder fällt. der Platte *a* ist, mit ihr einen Winkel von 9° bildend, eine ere quadratische Platte *a'* von gleicher Stärke und 60 mm angeordnet, welche die Dosenlibelle zur Horizontalstellung Instruments trägt. Unter der Libelle befindet sich die aubenmutter, mittels der das Ganze auf einem leichten Statif stigt wird. Durch Veränderung der Fallhöhen, durch Ver-

setzung des Gegengewichts sind die verschiedensten Kombinationen möglich. Sinus, Bögen und Tangenten fallen in ihren Werthen für die Winkel bis [illegible] hinreichend genau zusammen, so dafs Abstand genommen werden konnte von einem gekrümmten Millimetermafsstabe, dessen minimal gröfsere Genauigkeit die damit verknüpften Umständlichkeiten nicht aufgewogen hätte. — Legt man zu beiden Seiten des Ambofs auf die Platte *a* zwei dreiseitige Korkprismen von 12 mm Höhe [illegible]0 mm von einander entfernt und über diese Prismen ein Glasplättchen von 100 mm Länge, 30 mm Breite und 3 mm Stärke, so kann das Instrument auch zur Vergleichung von Tonstärken dienen. — Mit [illegible] Belastung ist das Fallstäbchen empfindlich genug für gröfsere Innenräume. Alle Theilchen mufsten so leicht als möglich gemacht werden, um bei hinreichender Widerstandsfähigkeit grofse Fallhöhen und so Genauigkeit zu erzielen. Für bedeutendere Entfernungen im Freien können auch die gröfseren Belastungen nutzbar werden. Die Feststellung der Reizschwelle mittels des Fallstäbchens ist nur möglich durch eine gröfsere Zahl von Versuchen (mindestens 10—12), aus deren Ergebnissen das Mittel zu nehmen ist. — Die Kraft, mit der ein fallender Körper auf einen ruhenden aufschlägt, ist proportional dem Produkt aus seinem Gewichte und dem Quadrate seiner Endgeschwindigkeit. Die Endgeschwindigkeit ist gleich der Quadratwurzel aus der Fallhöhe, so dafs beim Fallstäbchen bei gleichem Gewichte (derselben Stellung des Gegengewichts) die Fallhöhen unmittelbar selbst die Verhältnifszahlen der entsprechenden Aufschlags- oder Stofskräfte darstellen, denen wiederum proportional die Schallkraft des Instruments sein wird. Die doppelte, dreifache Fallhöhe zeigt also auch eine doppelte, dreifache u. s. w. Schallkraft des Apparats an. Nach der Theorie müfste nun für die doppelte Entfernung die vierfache Fallhöhe (Schallstärke) zur Erregung der Reizschwelle erforderlich sein. Dies trifft indessen nirgends zu. Bei Innenräumen war das durch die Mitwirkung der Reflexe unschwer zu erklären. Anders lag die Sache auf freiem Felde, wo es für alle Entfernungen immer nur die gleiche in derselben

:ise reflektirende Fläche, die Bodenfläche, gab. Die Ver-
he hierfür fanden auf einer grofsen Waldblöfse in den
dersdorfer Forsten statt. Das Gegengewicht wurde auf
mm Entfernung von der Drehachse eingesteckt, um das
nste Fallgewicht und die gröfsten Fallhöhen zu erzielen.
Reizschwelle wurde erreicht bei stiller Luft den 17./7. 95.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| auf | 20 m | Entfernung mit | 1,25 mm | Fallhöhe | I. |
| „ | 40 m | „ „ | 3,64 mm | „ | |
| „ | 80 m | „ „ | 11,40 mm | „ | |

Aus den vielen anderweiten Messungen wurden trotz nicht
ig ruhiger Luft und mancherlei Störungen doch immer durch-
nittlich ähnliche Resultate erzielt, welche zeigten, dafs auf
er Fläche für die doppelte Entfernung nur die dreifache (nicht
vierfache) und für die vierfache Entfernung nur die neun-
ıe (nicht die sechszehnfache) derjenigen Fallhöhe genügte,
che auf die einfache Entfernung die Reizschwelle erregt
:e. Auf die Lehre vom Quadrat der Entfernungen lassen
diese Vorgänge nur zurückführen, wenn man nachweisen
nte, dafs die Wirkungen der Reflexe mit der zunehmenden
fernung bei diesem einfachsten Falle, bei nur Einer reflek-
ıden Fläche dennoch ebenfalls (was ich bis dahin nicht
ınnt hatte) in bestimmter Weise mitwachsen. Dieser
hweis ist hier thatsächlich zu erbringen. Die für die
einschonung rauh gepflügte Fläche war in ihrer ganzen
dehnung gleichmäfsig mit Gras und Heidekrautbüscheln
achsen. So waren überall dieselben gleichmäfsig ver-
lten Reflexflächen vorhanden, die trotz ihrer Kleinheit durch
aufserordentliche Anzahl wirkten. Die Eigenschaft einer
›senfläche bringt es mit sich,
alle Schallwellen, welche von
einen Brennpunkte *a* aus-
en, von allen Punkten (d. h.
nserm Falle von allen jenen
ıen Reflexflächen), die inner-
der Ellipse liegen, nach dem andern Brennpunkte *c*



reflektirt werden. Denkt man sich das Instrument in dem einen, den Hörer im andern Brennpunkte auf 20 m Entfernung und nimmt für die Reflexe, die den direkten Schall wirksam zu unterstützen geeignet sind, bei der kurzen Dauer des Fallschlages einen gröfsten Wegeunterschied von 6 m an, so liegen die Scheitel $^6/_2 = 3$ m von den Brennpunkten, und die reflektirende Ellipsenfläche hat bei 20 m Entfernung einen Inhalt von $\pi \cdot 107{,}9$, bei 40 m Entfernung zwischen Instrument und Hörer einen Inhalt von $\pi \cdot 261{,}9$. Letztere Fläche ist 2,6 mal gröfser, wird also, da die reflektirenden Punkte in beiden Fällen gleichmäfsig vertheilt sind, auch in demselben Verhältnifs stärker wirken. Ist bei 20 m Entfernung die Fallhöhe = 1,20 mm, bei 40 m Entfernung = 3,6 mm (indem man von allen Zufälligkeiten und Fehlern absieht), so hat man bei einer Reflexionswirkung der Bodenfläche von 18 % für

20 m Entfernung die Schallstärke $S = 1{,}2 + 1{,}2 \cdot 0{,}18$

40 m „ „ „ $S' = 3{,}6 + 3{,}6 \cdot 0{,}18 \cdot 2{,}6$

Hieraus

$$S = 1{,}416$$
$$S' = 5{,}285$$

Nach den Kräftegesetzen sollte sein:

$$S' = 4 \cdot S = 4 \cdot 1{,}416 = 5{,}664$$

Der Unterschied $5{,}664 - 5{,}285 = 0{,}379$ ist durch die Mitwirkung der Reflexe höherer Ordnung zu erklären. Will man diese letzteren bei der Reflexionswirkung gleich von vornherein mit in Rechnung ziehen, so findet man durch Näherung statt 18 % ziemlich genau 26 %.

$$S = 1{,}2 + 1{,}2 \cdot 0{,}26 = 1{,}51$$
$$S' = 3{,}6 + 3{,}6 \cdot 0{,}26 \cdot 2{,}6 = 6{,}03$$
$$S' = 4 \cdot S = 4 \cdot 1{,}51 = 6{,}04.$$

In demselben Mafse wächst die reflektirende Fläche bei 80 m Entfernung gegenüber derjenigen bei 40 m Entfernung, so dafs hieraus erhellt: Auf die doppelte Entfernung äufsert die dreifache Fallhöhe durch die Mitwirkung der Reflexe immer die von den Kräftegesetzen verlangte vierfache Schallstärke. — Berechnet man aus den Winkeln der Tabelle 99 Seite 240 der

Vierordt'schen Messungen die Sinus, d. h. die Fallhöhen, so findet man, dafs auch hier auf freiem Felde die für die Reizschwelle auf die doppelte Entfernung erforderliche Fallhöhe fast genau die dreifache, für die vierfache Entfernung die neunfache derjenigen Fallhöhe beträgt, welche für die einfache Entfernung nöthig war.

Messungen im Hochwalde (Juli 1895) zeigten, dafs dort für die doppelte Entfernung die 2,5fache Fallhöhe erforderlich wurde. Aufserdem wurde die Fallhöhe für 10 m Entfernung im Walde = 0,54 mm und gleich darauf für die gleiche Entfernung in einem ländlichen Saale = 0,32 mm, also um 40% geringer gefunden. Dies Ergebnifs war überraschend, erklärt sich aber aus der im Saale herrschenden vollkommenen Ruhe der Luft und aus seiner Resonanz, während im Walde der Temperaturdifferenz wegen ein ewiges Ausgleichen und Bewegen der Luftschichten auch bei scheinbarer Ruhe, ebenso ein stetes leises Summen und Surren der Insektenwelt stattfindet. II.

Innenräume. Im Saale der Philharmonie Oktober 1894 war III.

auf 20 m Entfernung die Fallhöhe = 4,5 mm
„ 33 m „ „ „ = 8,0 mm
„ 35 m „ „ „ = 7,2 mm

Nach dem Quadrat der Entfernung hätten sein müssen

auf 33 m Entfernung die Fallhöhe = 12,2 mm
„ 35 m „ „ „ = 13,5 mm

Die thatsächlichen Fallhöhen waren also auf 33 m Entfernung mit 63%, auf 35 m Entfernung mit 53% derjenigen Fallhöhe ausreichend, die nach dem Quadrat der Entfernung hätten stattfinden müssen. Der Punkt auf 35 m Entfernung lag in einem abgerundeten Winkel, daher wegen der dort sich häufenden Reflexe die sehr geringe Fallhöhe von 7,2 mm.

Wie in der Philharmonie, so wurde auch im Tivolisaal in Berlin mit $^1/_{10}$ Belastung gemessen. Oktober 1895 ergab sich in letzterem

auf 20 m Entfernung die Fallhöhe = 4,1 mm IV.
„ 40 m „ „ „ = 9,8 mm

Statt der vierfachen Fallhöhe war also nur die $\frac{9,8}{4,1}$, d. h. die 2,4 fache Fallhöhe ausreichend. Der Saal ist 65 m lang, dabei nur 10 m breit, 6,5 m durchschnittlich hoch. Obwohl Philharmonie wie Tivoli vom Strafsenlärm entfernt liegen, brachte es das dumpfe Geräusch der Grofsstadt Berlin dennoch mit sich, dafs für 20 m Entfernung sehr viel gröfsere Fallhöhen genommen werden mufsten, als auf freiem Felde oder im Walde. Hierauf kommt es aber in unserer Untersuchung weniger an, als auf das Verhältnifs der Fallhöhen für die einfache, zweifache, dreifache u. s. w. Entfernung.

In der grofsen Maschinenhalle der Ausstellung Moabit war dieses Tosen sogar so stark, dafs mit $^5/_{10}$ Belastung des Fallstäbchens (Dezember 1895) gearbeitet werden mufste. Die Halle ist 67,5 m lang, 24,6 m breit. In der Längsachse ergab sich

V. auf 20 m Entfernung eine Fallhöhe von 2,6 mm
„ 40 m „ „ „ „ 8,0 mm

Weder Reflexe von der hohen Decke noch von den hinreichend entfernten Längswänden kamen in Betracht. Die Verhältnisse gestalteten sich wie auf freiem Felde: für die doppelte Entfernung etwa die dreifache Fallhöhe.

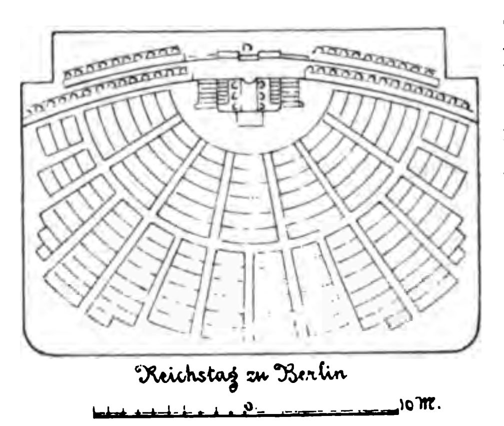
Näheres enthält meine Abhandlung: „Centralbau oder Langhaus?“ Aber auch schon aus den Ergebnissen III und IV geht hervor, dafs bei Innenräumen auf die weiteren Entfernungen von 40—50 m, bei denen das Verständnifs am ehesten nothleidet, nur etwa die doppelte Schallstärke derjenigen auf 20—25 m Entfernung ausreicht. Die mit den Entfernungen wachsende Gröfse der reflektirenden Ellipsenflächen in den Zuschauerreihen, Decke und Längswänden, Fig. 13 und 14 § 42, weist ebenfalls hierauf hin. Von einem Gespräch in weiterer Entfernung hört man, wenn man sich nähert, zuerst die Vokale, dann erst nach und nach die Konsonanten der Silben, und hiermit erst beginnt das Verstehen. Die erste Bedingung also für das Verständnifs der Rede ist die deutliche Aussprache der Konsonanten. Dann wird selbst beim Flüstern, trotz der Herabminderung des Vokalklangs auf ein Minimum,

das Wort selbst auf den entferntesten Plätzen eines grofsen Raums verstanden. Die Geräusche der Konsonanten lassen sich sehr wohl mit dem Geräusch des Fallstäbchens vergleichen, das nach obigen Untersuchungen (II, III und IV) in Innenräumen mindestens ebenso weit und ebenso stark hörbar war wie im Hochwalde. Da nun im Hochwalde ein deutlich gesprochener Satz bekanntlich auf 50—60 m weit bequem verständlich ist, darf man zu folgern berechtigt sein, dafs auch in Sälen, sobald dieselben von störenden Reflexen frei sind, ebenfalls auf dieselben Entfernungen die Rede gehört und begriffen werden wird.

Parlamentssäle. Die Anordnungen für die Sitzungssäle der Volksvertretungen sind schwierige Aufgaben für den Baumeister. Der Verkehr zwischen den Abgeordneten, dem Präsidium und den Vertretern der Regierung mufs sich leicht und bequem abwickeln. Von den Sitzen mufs man auf kürzestem Wege nach der Tribüne und zurück gelangen, vor allem aber mufs man überall gut verstehen können, was der Vorsitzende anordnet, was der Redner sagt und was die Regierungsvertreter erwidern. Nach mancherlei Versuchen hat sich für Berlin folgendes Schema ausgebildet. (Provisorischer Reichstagssaal.) In der Mitte der Längsseite erheben sich die Sitze des Präsidiums, rechts und links davon die des Reichskanzlers und der Bundesbevollmächtigten. Vor dem Präsidium die Rednertribüne und tiefer davor der Tisch für die Stenographen. Gegenüber steigt in kreisförmigen Sitzreihen, welche durch radiale Gänge unterbrochen sind, das Plenum des Hauses auf. Diese Anordnung, bei der das Präsidium sämmtliche Faktoren zu übersehen im Stande ist, und der Vorsitzende wie der Redner und ebenso die Regierungsvertreter von ihren Plätzen aus zum Hause sprechen können, erfüllt alle billigen Anforderungen. Die Bundesbevollmächtigten sind allerdings in zwei Gruppen gespalten, aber dennoch zum raschen Verkehr mit einander nahe genug. Aus ihnen eine Gruppe hinter dem Präsidium zu schaffen geht nicht an, da dann der Vorsitzende nicht sieht, wenn ein Regierungsvertreter das Wort

verlangt. Und wie im Preufsischen Abgeordnetenhause dem Präsidium gegenüber eine solche Gruppe anzuordnen, hat den noch gröfseren Uebelstand, das Haus damit in zwei Theile zu zerschneiden, aufserdem dem Ministertisch eine gewisse Aehnlichkeit mit einer Armsünderbank zu geben.

Das Schema des provisorischen, das sich im allgemeinen bewährt hatte, wurde auch auf den neuen definitiven Reichstagssaal im Grundrifs übertragen. Sei es indessen, dafs Wände und Decke doch anders ausgebildet wurden: sofort nach der Eröffnung wurde über die Akustik geklagt. Auf den entfernteren Sitzen und auf den Tribünen des Publikums konnte man nicht immer verstehen. Dabei sind die Abmessungen, 29 m Länge zu 22 m Breite, keine so ungewöhnlichen, dafs die menschliche Stimme sie nicht bequem beherrschen könnte. Ein Zufall führte mich vor etwa zwei Jahren in den Reichstag, als wegen der Soldaten - Behandlungen der Redekampf zwischen dem Kriegsminister Bronsart von Schellendorf und dem Abgeordneten Bebel stattfand. Des letzteren kraftvoller Stimmenklang war auf meinem Tribünenplatz gegenüber dem Präsidium tadellos zu verstehen; etwas weniger gut, aber immer noch deutlich durch die scharfe Accentuirung war die Rede des Ministers. Die bei dieser Gelegenheit herrschende Aufmerksamkeit und Stille des Hauses wie der Tribünen begünstigte natürlich die Verständlichkeit erheblich. War diese Ruhe nicht vorhanden, wufsten die Redner nicht zu fesseln, so wurde die Hörsamkeit des Saales auch in Frage gestellt. Man kann nun nicht verlangen, dafs alle Abgeordnete einen hinreifsenden Vortrag haben, aber sie müfsten doch im Besitz eines nicht zu schwäch-

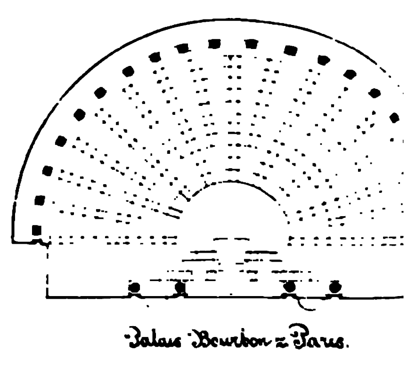

Reichstag zu Berlin

lichen Organs sein und sich einer deutlichen Aussprache befleifsigen. Das scheint aber heute, wo auf feste Parteigesinnung, auf Wahltaktik und alle möglichen andern Rücksichten der Hauptwerth gelegt wird, immer mehr Nebensache zu werden. Dabei ist es freilich kein Geheimnifs, dafs es für die entscheidenden Abstimmungen, deren Resultat von vornherein feststeht, gar nicht mehr auf die Reden der Parteien für oder wider ankömmt. Was man spricht, spricht man „zum Fenster hinaus“, nicht für das Haus, sondern für die Presse. Die Zeitungs-Berichterstatter können sich ja die amtlichen Stenogramme besorgen. Aber damit drückt man doch das Ansehen der Verhandlungen, deren Oeffentlichkeit in der Verständlichkeit ihren Schwerpunkt findet, erheblich herunter.

Wie könnte man sich mit diesen nun einmal bestehenden Verhältnissen abfinden; wie die Akustik bessern und damit die Aufmerksamkeit heben? Man hätte die Sitzreihen der Abgeordneten stärker ansteigen lassen müssen. Die jetzige Gesammtüberhöhung beträgt etwa 1 m. Bei einer Steigung von 1 : 5, die doch nicht unbequem ist, würde die letzte Sitzreihe 2,5—3 m höher als die erste gelegen, und die Hörsamkeit des Raumes erheblich gewonnen haben. — Die glatten Glasplatten der ausgedehnten Oberlichtfläche reflektiren mit geringem Verlust und diese kräftigen Reflexe fallen bei der Höhe des Raumes nicht mehr mit der Silbe zusammen, zu der sie gehören, sondern in die folgende und stören so das Verständnifs. Dieser Uebelstand ist zu beseitigen, wenn man den Platten bei ihrer Herstellung die Form einer flachen Kappe gegeben hätte. — Hierzu würde ferner beitragen, wenn man statt der wenig schönen Bogenlichtkugeln unter der Decke lieber sehr viel tiefer eine grofse Mittelkrone und vier kleinere mit Glühlichtflammen angeordnet hätte, die den grofsen leeren Mittelraum akustisch sehr günstig und zugleich sehr viel geschmackvoller als die Bogenlichter unterbrochen haben würden. —

Der durch Joly 1838 im Palais Bourbon zu Paris errichtete Sitzungssaal für 500 Abgeordnete zeigt die Form

eines antiken Theaters, dessen Plätze sich in zweima... ...ie ein schmaler Umgang (präcinctio) trennt, i... ...förmigen Ringen übereinander bis zu 2,0 m Endhöhe... Hinter der obersten Sitzreihe ganz in klassischem... Säulenumgang von 32,5 m Durchmesser, hinter w... Tribünen des Publikums liegen. Dem Halbrund ... gegenüber Präsidium und Rednerstand. Die Ar... würdig und schön. Sie ist auch praktisch, denn die Form des halben Hohlkegels, gegen welche vom Mittelpunkte aus gesprochen wird, ist für die Akustik sehr vortheilhaft. Bei dem Wettbewerb für das Reichstagsprojekt hatte Thiersch mit Recht den Halbkreis, Kaiser und Groszheim einen D... Kreis bei der Anordnung der Sitzreihen des Hauses.



Palais Bourbon z. Paris.

Wer die antiken Theater kennt, weiſs wie über... gut man noch jetzt selbst in den Trümmern hört. ... Reise durch Südfrankreich im April v. J. besuchte ... das römische Theater in Orange. Der Bau faſste ... 6000 – 7000 Menschen. Oben auf der äuſsersten St... verstand ich bei 75 m Entfernung trotz des scharfen ... die Erklärungen, die der Custode auf dem Platze ... Scene den andern Besuchern anthat. Die untere H... alten Sitzreihen ist wieder hergestellt und zur Sor... giebt das Théâtre français hier einige Gastvorstellung...

Berlin, April 1...

A. Sturm...

D... W. P...metter in Berlin.



